INVESTIGACION Y CIENCIA

Edición en español de **SCIENTIFIC AMERICAN**



GENETICA DEL TRIGO

Marzo 1981

250 PTAS.

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

Número 54
Marzo 1981

INVESTIGACION Y
CIENCIA
Edición en español de SCIENTIFIC AMERICAN

EDITA Prensa Científica S.A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (ESPAÑA)

Colaboradores de este número:

Asesoramiento y traducción:

Julio Rodríguez Villanueva: *Viroides;* Francisco Navarro: *El corazón artificial;* Manuel Puigcerver: *La galaxia de Andrómeda;* Enrique Sánchez Monge: *Los recursos genéticos del trigo silvestre;* Juan-Pedro Acordagoicoechea: *El problema cuerpo-mente;* José Luis Castillo: *Geles;* Vicente Maraña: *Historia paralela del teléfono;* Luis Bou: *Temas metamágicos;* J. Vilardell: *Taller y laboratorio.*

Ciencia y sociedad:

José M.ª Suñé Arbussá

Libros:

Ramón Pascual, Antonio Prevosti y Mercedes Durfort



LA PORTADA

La pintura de la portada muestra la parte superior de las espigas, portadoras del grano, de tres plantas pertenecientes al género *Triticum,* una subdivisión de las Gramineae, la familia de las gramíneas. Las tres especies que se muestran son *T. tauschii* (*izquierda*), hierba silvestre nativa del centro y del sudoeste de Asia, *T. turgidum* (*centro*), forma primitiva de trigo que se originó en algún punto del sudoeste asiático, y una versión del *T. aestivum* o trigo común (*derecha*) obtenida por el hombre a partir del cruzamiento entre las dos primeras especies citadas, seguido del tratamiento de la planta híbrida con la droga colchicina para inducir la duplicación cromosómica, y, por tanto, la fertilidad completa en las generaciones subsiguientes. El aprovechamiento de la amplia reserva de variabilidad genética que poseen las especies silvestres próximas al trigo para la producción de híbridos anfiploides sintéticos, tales como el que se muestra en la cubierta, se considera esencial para la restauración y el enriquecimiento del acervo génico de los trigos cultivados (véase "Los recursos genéticos del trigo silvestre", pág. 50).

Suscripciones:
Prensa Científica, S. A.
Calabria, 235-239
Barcelona-29 (España)
Teléfono 322 05 51 ext. 41

Condiciones de suscripción:
España:
Un año (12 números): 2.750 pesetas
Extranjero:
Un año (12 números): 43 U.S.$
Ejemplar atrasado ordinario:
280 pesetas
Ejemplar atrasado extraordinario:
420 pesetas

Distribución para España
Distribuciones de Enlace, S. A.
Ausias March, 49, Barcelona-10

Distribución para los restantes países:
Editorial Labor, S. A.
Calabria, 235-239 - Barcelona-29

Publicidad:
Madrid:
Gustavo Martínez Ovin
Avda. de Moratalaz, 137, Madrid-30
Tel. 430 84 81
Cataluña:
Miguel Munill
Balmes, 191, 2.º, 2.ª, Barcelona-6
Tels. 218 44 45 y 218 40 86

Controlado por O.J.D.



PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Pintura de la portada de Enid Kotschnig

Página	Fuente
6-8	M. Ballesteros
9	A. Sellés
10	A. Sellés (*arriba*), M. Ballesteros (*abajo*)
11	A. Sellés
12	M. Ballesteros (*arriba*), A. Sellés (*abajo*)
13-15	M. Ballesteros
16	A. Sellés
19	José M. Sogo y Theo Koller, Instituto Politécnico Suizo
20-21	Allen Beechel
22	T. O. Diener, Plant Virology Laboratory, Beltsville, Maryland
23	Allen Beechel
24-25	Allen Beechel (*arriba y abajo derecha*); William L. McClements y Paul J. Kaesberg, Universidad de Wisconsin (*abajo izquierda*)
29-35	Patricia J. Wynne
40	George V. Kelvin
42	Observatorios Hale
43	Kitt Peak National Observatory (*arriba*) George V. Kelvin (*abajo*)
44	George V. Kelvin
45	Instituto Max Planck de Radioastronomía
46-47	George V. Kelvin
51-52	Shalom Nedam, Instituto Weizman de Ciencia
53	Enid Kotschnig (*arriba*), Ilil Arbel (*abajo*)
54-55	Ilil Arbel
56	Enid Kotschnig
57-59	Ilil Arbel
60	T. Mello Sampayo, Fundación Calouste Gulbenkian, Oeiras, Portugal
63-70	Jerome Kuhl
72	Museo del Louvre
77	Fritz Goro
78-79	Gabor Kiss
80	Fritz Goro
81-89	Gabor Kiss
94	Institución Smithsoniana (*arriba*), Biblioteca del Congreso de los EE.UU. (*abajo*)
96	David A. Hounshell, Universidad de Delaware
97-100	Dan Todd
101	Scientific American
103	Alan D. Iselin
109	Jearl Walker (*arriba*), Christopher Heilman (*abajo*)
110-114	Michael Goodman

ISSN 0210-136X
Dep. legal: B. 38.999-76
Fotocomposición Tecfa
Guipúzcoa, 36 (local 1) Barcelona-20
Fotocromos reproducidos por GINSA, S. A.
Imprime GRAFESA
Gráfica Elzeviriana, S. A.
Nápoles, 249 - Tel. 207 40 11
Barcelona-13
Printed in Spain · Impreso en España

Los autores

MANUEL BALLESTEROS GAIBROIS ("Racchi, un enigma arqueológico"), catedrático de historia de América prehispánica de la Facultad de Geografía e Historia de la Universidad Complutense de Madrid, preside la sección de Historia de América y dirige el Departamento de Antropología y Etnología de América en dicho centro superior. Doctorado en historia de América por la Universidad de Madrid (1931) y en antropología por la Universidad Kaiser Wilhelm de Berlín (1935), ocupó la cátedra de historia universal y de la cultura, por oposición, en la Facultad de Filosofía y Letras de Valencia (1940-1949), pasando por oposición a la que actualmente ocupa. Ha escrito una *Historia Universal,* (2 volúmenes), *Historia de la Cultura, Historia de América* e *Historia de España.* El Gobierno español, en virtud de un convenio, le encargó la dirección de las excavaciones en los palacios incaicos de Chinchero (1966-1971); desde 1977 dirige las de otra misión española en Racchi.

T. O. DIENER ("Viroides") es investigador patólogo del Laboratorio de Virología Vegetal del Departamento de Agricultura en Beltsville, Maryland. Recibió su educación universitaria en el Instituto Politécnico de Zurich, por el que se doctoró en fitopatología en 1948. Llegó a Estados Unidos en 1950 y durante la década siguiente estudió árboles frutales infectados con virus, en una estación experimental de la Universidad estatal de Washington. Desde que, en 1959, empezó a trabajar para el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos, ha investigado diversos aspectos de las enfermedades víricas en vegetales. Fue precisamente en el curso de estas investigaciones cuando Diener descubrió el nuevo grupo de agentes productores de enfermedades ahora conocidos como viroides.

ROBERT K. JARVIK ("El corazón artifical") enseña cirugía y bioingeniería en la Facultad de Medicina de la Universidad de Utah, donde se graduó en medicina en 1976. Su interés por la ingeniería médica se remonta a sus años de escuela superior, cuando empezó a trabajar sobre instrumentos de sutura automática. Ingresó en la Escuela de Arquitectura de la Universidad de Siracusa, pero, según dice, cambió estos estudios por los de medicina cuando operaron a su padre de un aneurisma aórtico en 1965. Durante sus estudios continuó trabajando sobre instrumentos de sutura quirúrgica automática, consiguiendo varias patentes en los Estados Unidos y en el extranjero. Jarvik frecuentó la Facultad de Medicina de la Universidad de Bolonia durante dos años y se especializó en biomecánica en la Universidad de Nueva York antes de incorporarse al programa del corazón artificial de Utah, en el año 1970.

PAUL W. HODGE ("La galaxia de Andrómeda") es profesor de astronomía en la Universidad de Washington. Se graduó en la Universidad de Yale en 1956 y obtuvo su doctorado en la de Harvard en 1960. Antes de ingresar en el cuerpo docente de Washington, en 1965, enseñó e hizo trabajo de investigación en varias instituciones, entre ellas Harvard, los Observatorios Hale, el Instituto de Tecnología de California, la Universidad de California en Berkeley y el Observatorio Astrofísico Smithsoniano. Es autor de 10 libros y más de 200 artículos y publicaciones científicas. La Universidad de Yale le otorgó el Premio Beckwith de astronomía en 1956 y la de Harvard el Bart J. Bok en 1962. En 1978-79 fue presidente de la sección de astronomía de la Asociación Americana para el Progreso de la Ciencia.

MOSHE FELDMAN y ERNEST R. SEARS ("Los recursos genéticos del trigo silvestre") han mantenido una prolongada colaboración en el estudio de la genética del trigo. Feldman es profesor de genética en el Instituto Weizmann de Ciencia, en Israel. Nacido en Israel en 1933, estudió botánica, genética y bioquímica en la Universidad Hebrea de Jerusalén, por la que obtuvo su título de doctor. En 1964 trabajó con Sears como becario postdoctoral en la Unidad de Investigación Genética sobre Cereales del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en la Universidad de Missouri. Tres años más tarde pasó a la Universidad de Manitoba, Canadá, donde prosiguió sus investigaciones. Feldman volvió a Israel en 1969 y se incorporó al Instituto Weizmann. Sears se acaba de jubilar tras 44 años de labor en el Servicio de Investigación Agrícola, un organismo del Departamento de Agricultura. Creció en una finca del oeste de Oregón y se licenció en agricultura por el Oregon State College en 1932, doctorándose en biología en 1936 por la Universidad de Harvard. Por sus trabajos sobre el origen, evolución y citogenética del trigo ha obtenido numerosos premios, entre ellos el Hoblitzelle, en 1958, por la transferencia de la resistencia a la roya parda desde la gramínea silvestre *Triticum umbellulatum* al trigo.

JERRY A. FODOR ("El problema cuerpo-mente") enseña en el Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Obtuvo su licenciatura por el Columbia College y el doctorado en filosofía por la Universidad de Princeton. Escribe: "He sido miembro del MIT más o menos ininterrumpidamente desde 1960, y ahora simultaneo la enseñanza en el departamento de psicología y en el departamento (de reciente creación) de lingüística y filosofía. He escrito libros y artículos en los tres campos. Mis intereses se centran (casi en orden inverso) en problemas de teoría del significado, temas experimentales de psicolingüística y psicología del conocimiento, problemas de filosofía de la mente y en los barcos de vela".

TOYOICHI TANAKA ("Geles") es profesor agregado de física del Instituto de Tecnología de Massachusetts. Natural del Japón, cursó sus estudios en la Universidad de Tokio, donde permaneció hasta la obtención del título de doctor en ciencias físicas, en 1972. Ese mismo año consiguió una beca de investigación en biofísica en el Instituto de Tecnología de Massachusetts, y, desde entonces, realiza su tarea investigadora en dicho centro.

DAVID A. HOUNSHELL ("Historia paralela del teléfono") enseña historia en la Universidad de Delaware. Tiene a su cargo la sección tecnológica del Museo Hagley, de Wilmington, Delaware. Dice: "crecí en campos petrolíferos al sudeste de Nuevo México y, mientras estuve en el instituto y durante mis dos primeros años en la Universidad Metodista del Sur, trabajé en vacaciones para un contratista de instalaciones eléctricas. Allí aprendí a hacer de todo, desde doblar un tubo hasta diseñar unidades de control automático. Fue una gran experiencia y la razón por la que obtuve mi graduación en ingeniería eléctrica. Me picó el gusanillo de la historia, y, sin embargo, fue más tarde cuando descubrí que podía comprender mejor las grandes cuestiones sobre tecnología y sociedad a través del estudio de la historia que por medio del trabajo rutinario de ingeniería".

Hace...

José M.ª López Piñero

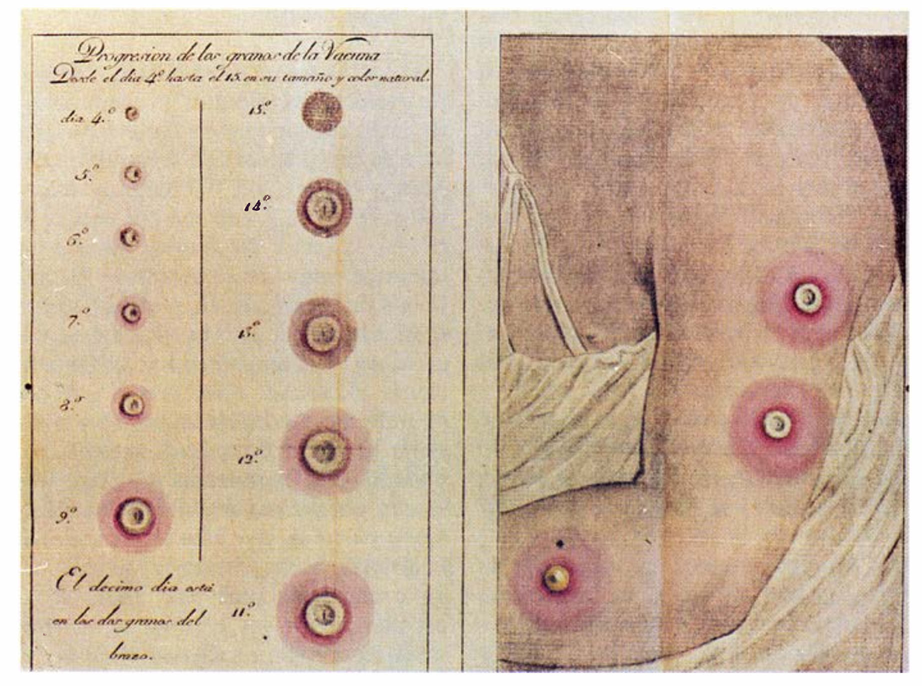
... doscientos años

Marchó a América Francisco Javier de Balmis. Hijo y nieto de cirujanos, Balmis había seguido desde muy joven la tradición familiar. Al terminar sus estudios secundarios ingresó como practicante en el Hospital Real Militar de Alicante, donde se formó trabajando durante cinco años junto al cirujano mayor de dicha institución. También sirvió como practicante militar en la expedición contra Argel de 1775. Tres años más tarde, obtuvo el título de cirujano, tras aprobar el examen reglamentario ante el Tribunal del Protomedicato de Valencia y, ya como cirujano militar, participó en el sitio de Gibraltar de 1780.

Balmis permaneció en el Nuevo Mundo durante once años, trabajando en diferentes hospitales y guarniciones de las Antillas y de México. Ocupó, entre otros cargos, el de cirujano mayor del Hospital del Amor de Dios, de México (1787-1788). En 1970, fue encargado de la sala de enfermos venéreos del Hospital de San Andrés, también de la capital mexicana, donde tuvo que comprobar la eficacia de un remedio indio contra tales afecciones, cuyo principal ingrediente eran las raíces de especies locales de agave y de begonia. Balmis eliminó del remedio componentes innecesarios o de tipo supersticioso y consideró eficaz la acción terapéutica de las citadas raíces, a la vista de los resultados que obtuvo en varios centenares de casos.

En enero de 1792, Balmis partió hacia la península, con un cargamento de cien arrobas de maguey y treinta de begonia, comisionado para difundir el remedio en la metrópoli. En la Corte encontró, sin embargo, una cerrada oposición, principalmente por parte de Bartolomé Piñera Siles, influyente miembro del Protomedicato. Aparte de ensayar la nueva terapéutica en tres hospitales de Madrid, el cirujano alicantino escribió para defenderse una notable monografía sobre el tema, titulada *Demostración de las eficaces virtudes nuevamente descubiertas en las raíces de dos plantas de Nueva España, especies de Agave y Begonia, para la curación del vicio venéreo y escrofuloso* (1794).

Balmis se había graduado en artes por la Universidad de México (1787) y obtuvo el título de bachiller en medicina en la Universidad de Toledo (1797). Siguió después dos cursos en el Real Estudio de Medicina Práctica de Madrid y obtuvo, al parecer, el título de doctor en medicina en fecha y universidad que desconocemos. Su prestigio profesional en la Corte se hizo muy notable y en 1795 fue nombrado cirujano honorario de cámara de Carlos IV.



Fases de los "granos de la vacuna". Lámina del prólogo de Balmis a su traducción del tratado sobre la vacunación de Moreau de la Sarthe (1803)

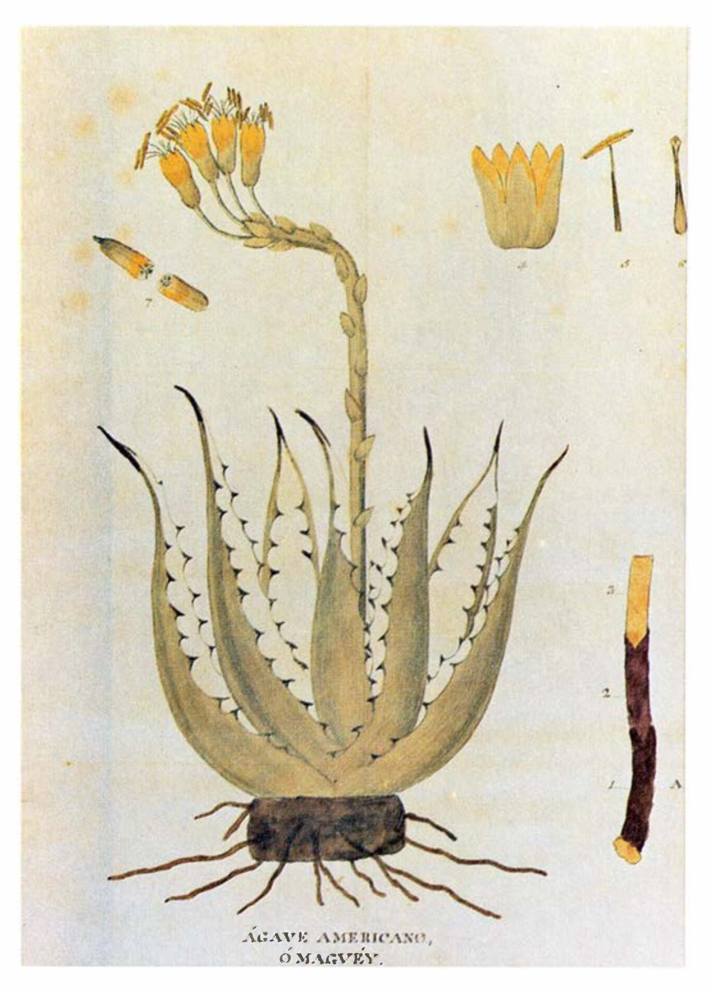
Cuando Edward Jenner dio a conocer su descubrimiento de la vacunación antivariólica, Balmis se encontró entre sus más tempranos partidarios. Fruto de su preocupación por el tema fue la traducción del tratado sobre la vacuna de Jacques Louis Moreau de la Sarthe. Apareció a comienzos de 1803, con un amplio estudio introductorio del propio Balmis, que refleja sus sólidos conocimientos y su amplia experiencia práctica en la materia. En junio del mismo año, la Junta de Cirujanos de Cámara, integrada por tres figuras de la talla de Antonio de Gimbernat, Leonardo Galli e Ignacio Lacaba, aprobó su proyecto titulado *Derrotero que debe seguirse para la propagación de la vacuna en los dominios de Su Majestad en América*. El proyecto incluía fundamentalmente siete puntos: "Artículo 1.º En un paquebot destinado a este fin se saldrá del puerto de La Coruña, dirigiéndose a la Isla de Tenerife, llevando vacunado uno de los niños que han de ir a este objeto para establecer en ella la práctica de la vacunación, y que pueda propagarse a las restantes Islas Canarias. Esta navegación dura por lo común ocho días.

Artículo 2.º De Tenerife se pasará a Puerto Rico, lo que sucede por lo regular en veinte días, y es la más larga que se presenta hasta llegar a Vera-Cruz.

Artículo 3.º De Puerto Rico se navegará a la Guayra, a donde se llega ordinariamente en ocho días. Desde este puerto subirán los vacunadores por tierra a la ciudad de Caracas, que está distante tres horas para establecer la vacunación, y en concluyendo volverán otra vez a la Guayra, para embarcarse y dirigirse al puerto de La Habana, a donde se suele arribar en ocho días.

Artículo 4.º Desde La Habana se pasará a Campeche, en cuya navegación se emplean cuatro días. De aquí se subirá a Mérida, que es la capital de esta provincia de Yucatán, a donde se llega en dos días, y en habiendo establecido la vacuna, se embarcarán en Campeche para ir a Vera-Cruz, en cuatro días, que es lo regular.

Artículo 5.º Desde este puerto, seguirán los vacunadores a la Villa de Jalapa en dos días: De aquí a la Puebla de los Angeles, en otros dos, y luego a Méjico en tres días, después de haber vacunado y establecido su propagación en todos los referidos pueblos; y respecto a que el resto de la navegación





El agave y la begonia. Grabados del libro que Balmis publicó sobre su uso en el tratamiento de la sífilis y la escrófula (1794)

que media, porque de ningún modo debe confiarse en el fluido vacuno, que puede llevarse entre cristales, por la facilidad con que degenera, entre el puerto de Acapulco y el Callado de Lima, debe hacerse en otro buque distinto para regresar a España desde Vera-Cruz el paquebot de la primera expedición con los niños españoles empleados en ella, si fuera del agrado de Su Majestad.

Artículo 6.º Introducida la vacuna en la capital de Méjico, e instruídos sus profesores de lo que les importa saber para continuar su práctica, dispondrá el director, de acuerdo con el virrey, la propagación de la vacuna en varias ciudades del reino, repartiéndose los empleados por los rumbos que más convenga y, en finalizando este trabajo, se reunirán en Méjico para la nueva expedición, que se ha de emprender desde el puerto de Acapulco hasta el Callado de Lima, cuya navegación suele tardar de veinticinco a treinta días, y a efecto de mantener la vacuna fresca bastarán 12 o 16 niños que se sacarán del hospicio de Méjico.

Artículo 7.º Habiéndose logrado introducir la vacuna en Lima y su propagación, dispondrá el director, de acuerdo con el virrey, se extienda esta saludable práctica por toda la tierra firme, formando tres divisiones en esta forma, la una se dirigirá desde Lima, Oruro, Tucumán a Buenos Aires. Otra desde Lima a Chile, y lo restante de este reino. Y la otra de Lima a Guayaquil, Quito, Popayán y Santa Fe."

El mismo junio de 1803, Balmis recibió el nombramiento de director de la "Real Expedición Marítima de la Vacuna". Se trata de la famosa expedición que, entre 1803 y 1806, dio la vuelta al mundo, propagando la vacuna antivariólica en extensos territorios de América y también en algunas zonas de Asia. Balmis debe su relieve histórico a esta gran empresa, cantada por Manuel José Quintana y elogiada de modo caluroso por autores de diversas naciones como uno de los hitos iniciales de la moderna medicina preventiva.

Integraban la expedición, aparte del director, cuatro cirujanos, dos practicantes, cuatro enfermeros y veintidós niños procedentes de la casa de expósitos de La Coruña, acompañados de su rectora. Los niños eran necesarios para conservar el virus vacunal, mediante inoculaciones semanales en dos de ellos con el obtenido en las pústulas de los vacunados la semana anterior. Balmis llevaba unos aparatos cuidadosamente preparados –termómetros, barómetros, una máquina neumática, miles de cristales para extensiones de pus, etc.– así como dos mil ejemplares del texto sobre la vacuna, que acababa de traducir y que estaba destinado a ser distribuido gratuitamente, para difundir los conocimientos precisos para la práctica de la vacunación.

La expedición extendió la vacuna por las Antillas, México, América Central y del Sur, Filipinas, Macao, Cantón y la isla de Santa Elena. A la América meridional fue llevada por un grupo de expedicionarios encabezado por Antonio Salvany, subdirector del viaje.

Balmis regresó a la península, pero volvió a México en 1810, huyendo de la persecución de los franceses invasores, a los que se había opuesto. En tierras mexicanas, se vio también envuelto en las luchas iniciales por la independencia, militando a favor del mantenimiento de la colonia. Volvió de nuevo a la metrópoli tres años más tarde, esta vez definitivamente. Al terminar la contienda, fue nombrado cirujano de cámara efectivo de Fernando VII, así como miembro de la Junta Superior de Cirugía.



Racchi (Perú), un enigma arqueológico

Un gran edificio, sesenta residencias, doscientos depósitos, una fuente y un estanque empedrado, ¿qué fueron? ¿qué destino tuvieron? El complejo arqueológico de Racchi es todavía un enigma interpretativo

Manuel Ballesteros Gaibrois

Los incas del Perú son uno de los pueblos que han dejado más pruebas de su potencia organizativa y constructora, similar a la de los egipcios, mesopotámicos, mesoamericanos y chinos. Miles de toneladas de piedra bien tallada, y de enormes adobones de barro, secados al calor del sol tropical, constituyen el testimonio de su esfuerzo, de su tesón y de su disciplina de trabajo. Perú está sembrado de andenerías –miles de kilómetros lineales de abancalados de tierra y piedra– y de palacios, depósitos (tambos), fortificaciones (pucarás) y recintos habitables. Desde el comienzo de la conquista, los europeos demostraron su admiración por estas empresas arquitectónicas, y los viajeros del siglo XIX revelaron al mundo sus magnificencias. Uno de ellos, E. George Squier (*Perú. Incidents of Travel and Exploration in the Land of the Incas,* MacMillan, Londres, 2.ª ed. 1878), realiza el más amplio de todos estos viajes y se detiene especialmente en la descripción y levantamiento de planos del sitio de Racchi, que le impresiona por la magnitud, grandeza y audacia de la construcción de un edificio, que tradicionalmente se llamó "Templo de Viracocha", por razones que estudiamos más adelante.

Aunque pueda parecer extraño, la inmensa extensión de ruinas que se denomina Racchi, y que describimos en este estudio, no había sido estudiada sistemáticamente hasta el año 1977. A partir de esa fecha, y en virtud del convenio suscrito por el Departamento de Antropología y Etnología de América de la Universidad Complutense de Madrid y el Instituto Nacional de Cultura del Perú se acomete la investigación del complejo arqueológico. Desde 1977 se han desarrollado cuatro campañas (1977 a 1980) bajo la dirección del autor de este artículo. El equipo estuvo integrado por los profesores Lorenzo López y Sebastián, Flor Portillo, Alicia Alonso Sagaseta y los estudiantes Maribel Quintana, Fernando Velasco y Carlos Sánchez. La misión hubo de hospedarse en el albergue de Tinta, a cinco kilómetros de Racchi, por no haberse podido habilitar el albergue que el I. N. de Cultura del Perú se comprometió a construir.

Desde la conquista española han pasado miles de visitantes, que han dejado noticia de lo que veían, ya que no es preciso un desvío importante para llegar hasta las ruinas. Estas se hallan sobre el "camino real del Inca", como designaron los conquistadores a las calzadas incaicas, y la carretera actual, que discurre entre el pueblo de Tinta y Hurin Racchi, nombre de la aldehuela campesina, levantada sobre las edificaciones del Inkanato. No, no se realizaron estudios sistemáticos, sino, por el contrario, muchas manos pecadoras "hurgaron" (esta palabra es más adecuada que la de "excavaron") por aquí y por allá, transportando de un lado a otro la tierra acumulada por el tiempo, o por los trabajos agrícolas de los campesinos. Este trasiego cambiaba de sitio los restos cerámicos que toda ruina atesora, y que en Racchi, sin ser muchos, son muy indicativos de las actividades antiguas del lugar.

En otras ocasiones, se hizo más: se cometió el pecado arqueológico de la reconstrucción que, como es sabido, no es lo mismo que la restauración. Si comparamos el grabado de la obra de E. Squier con una fotografía moderna [*véanse las ilustraciones de la izquierda y de la página siguiente*], notaremos enseguida que en esta última aparecen las bases de todas las "columnas" –llamémoslas provisionalmente así–, que hace un siglo no estaban allí. Han sido, simplemente, reconstruidas con cemento, aprovechando los sillares trapezoidales que aparecían dispersos en la superficie. Pero todo esto sucedió hace mucho tiempo, cuando los métodos de exploración arqueológica no eran tan depurados.

Antes de entrar en la consideración de la gran área arqueológica, conviene sentar algunos principios, indispensables cuando se trata de yacimientos pre-hispánicos de América, sin referencia escrita contemporánea, por la sencilla razón de la ausencia de escritos de aquellas culturas. [Cuando hablamos del pueblo y su cultura escribimos inca o incaico, mas para distinguir a los soberanos escribimos Inka.]

Para explorar un complejo arqueológico no basta la arqueología solamente, sino que hay que buscar documentación e información en las fuentes escritas por los laboriosos "escritores de Indias", que cuentan muchas cosas, aunque no siempre, como estimaremos en este estudio, absolutamente dignas de fe. Se hace, pues, necesaria la mención de los cronistas, para ir viendo el tipo de noticias que nos proporcionan.

Las informaciones de los cronistas parten de tradiciones recogidas de boca de los habitantes primitivos de la zona, a mitad de camino entre el lago Titicaca y Cuzco, dos lugares en cierto modo místicos, ya que del primero afirmaban

VISTA LATERAL DEL MURO MAESTRO del gran edificio de Racchi. Pueden observarse (primer plano, a la izquierda) los enlaces de todo el muro, que ahora aparece fragmentado, así como la huella de las inserciones de las vigas, arrancadas hace mucho tiempo, por su gran valor, dada la escasez de madera en la sierra peruana. La altura pasa de los quince metros. Las 'pilastras' laterales han sido reconstruidas.

los indios quechuas que procedía su estirpe, y el segundo fue el lugar donde se radicaron, para edificar su importante imperio. Una leyenda recogida por estos cronistas es que del Titicaca salió Viracocha –su dios– a predicar, pero que al llegar a Cacha (nombre antiguo de Racchi) fue atacado por los indios del lugar, ignorantes de su divinidad. En castigo, Viracocha hizo llover fuego del cielo, cuyas piedras calcinadas aún vieron los escritores del siglo XVI. Tras los cerros que rodean el área monumental se halla el muerto volcán Quimsachata. La leyenda no es otra cosa que la mitificación de una erupción volcánica. Luego, los españoles añadieron una versión deformadora, al asegurar que el predicador divino habría sido en realidad el apóstol San Bartolomé. Ambas versiones se funden en el hecho de que en Racchi había un santuario, que había sido construido por el Inka Viracocha, que había tomado el nombre de su dios, porque se le había aparecido; y en el santuario había colocado una estatua que lo representaba. Los cronistas "bartolomianos" aseguran que la estatua era del apóstol. Las diversas versiones corrían –y corren– impresas, dando pie a interpretaciones, sin apoyo en una realidad física, que sólo la exploración arqueológica podría desvelar. Dejando la leyenda a un lado, pasemos a los informantes, en lo que dicen del propio Racchi.

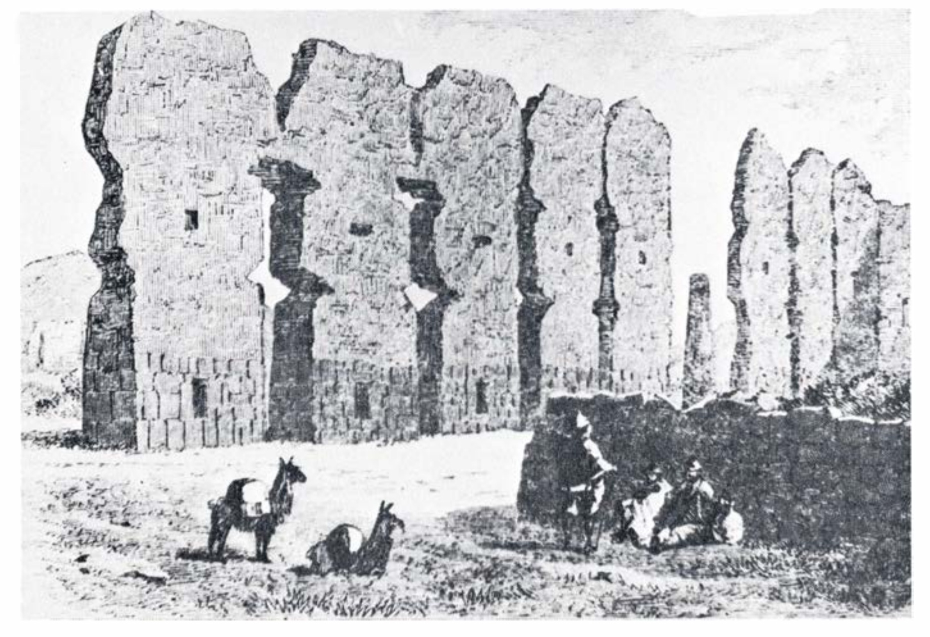
Pedro Cieza de León (*Primera parte de la Crónica del Perú,* cap. 98) informa que se edificó un santuario a Viracocha, en un "pequeño cercado", donde se halló, por los españoles, "alguna cantidad de oro". Que luego un posterior Inka, Tupac Yupanqui, edificó en aquel mismo lugar "grandes aposentos". Que en el santuario había una estatua, que él vio personalmente, del tamaño de un hombre. Otros cronistas, como el jesuita anónimo (*Relación de las costumbres antiguas de los naturales del Perú*), Miguel Cabello de Valvoa (*Misceláneа Antártica*) y el indio Felipe Huamán Poma de Ayala (*Nueva Coronica y Buen Gobierno*), insisten sobre las tradiciones de la aparición de Viracocha, la lluvia de fuego, etcétera, pero afirman que se construyó un santuario y que en él había una estatua del tamaño de un hombre. La confusión culmina con la información del Inca Garcilaso de la Vega (*Comentarios Reales de los Incas,* 1609), que por un lado dice lo mismo que los anteriores –la construcción de un santuario por obra de Inka Viracocha–, pero se lamenta de que fuera destruido hasta sus cimientos por los españoles, en busca de las ricas ofrendas de oro depositadas por los indios. Por otra parte, sin embargo, dedica largos párrafos a describir lo que él llama un "templo", con un muro central y grandes pilotes laterales a ambos costados, para sostener la techumbre. Se trata de una contradicción evidente, ya que si el "santuario" fue destruido, no puede luego describirse como existente. Anotemos que Garcilaso publicó su obra (1609) cuarenta años después de haber salido del Perú, en España, y que nunca estuvo en el lugar que describe. Asegura que la estatua existía aún en su tiempo, es decir, cuando salió del Perú.

Resumiendo: hay noticias de un santuario con una estatua del tamaño de un hombre, de "lluvia de fuego" con piedras calcinadas o erupción volcánica y de un gran "templo". Ante ello se imponía una severa exploración arqueológica, que pudiera poner en orden el "puzzle" de las informaciones escritas y contradictorias, pero con un fondo de verdad.

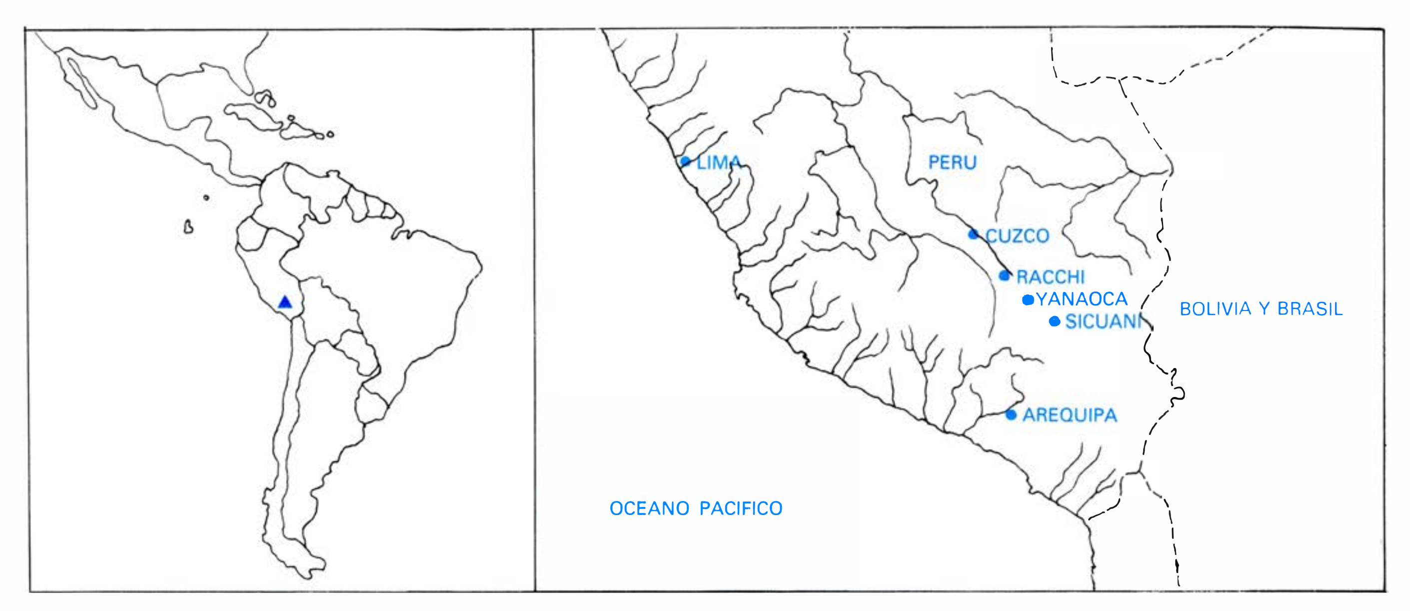
El area arqueológica de Racchi abarca aproximadamente 24 hectáreas de terreno, entre el río Vilcanota y los cerros volcánicos, circundado todo por una muralla incaica de burda factura. Dentro de este inmenso recinto hay que distinguir –como se muestra en el plano adjunto [*véase la ilustración superior de la página 10*]– varias partes.

En primer lugar, el "templo". Así se llama ahora, siguiendo las informaciones de Garcilaso. Se trata de una edificación de 92 metros de longitud, por 29,25 de ancho, que tiene en el centro un muro cuya base es de excelente cantería inca, del mejor estilo, con puertas que dan paso de un lado al otro y ventanas que permiten comunicación, como se ve en las fotografías [*véase la ilustración inferior de la página 10*]. Este muto –que los campesinos, en su lengua quechua, aún llaman *ingaperka* o "muro del Inca"– era el sostén maestro de toda la techumbre, como explicamos a continuación. La imagen actual es la de machones individuales, en número de nueve, porque dos de ellos se derrumbaron hace más de un siglo; pero se trata de una imagen falsa. El muro originalmente, por encima de las puertas de comunicación, tenía unos vanos de descarga, en forma de ventanas interiores, ya en la parte de construcción de adobones, sostenidas por vigas de aliso, que han sido arrancadas, dejando independientes cada uno de los machones de este muro único central. (Algún trozo de viga quedó incrustado y ha podido ser analizado. Este árbol no es de la región, sino de la ceja de montaña, o comienzo de la selva, lo que nos habla del transporte de lejanos materiales para la construcción de este edificio.)

A ambos lados del muro se levantaban once "columnas" con basamento, como el muro central, de piedra, hasta un metro o metro treinta centímetros de altura, continuando luego en material de barro, como se observa aún en



DIBUJOS DE E. GEORGE SQUIER en su obra *Perú. Incidents of Travel and Exploration in the Land of the Incas* (publicado por la editorial MacMillan; Londres; segunda edición, 1878). Hace más de un siglo los fragmentos del muro estaban en la misma disposición y conservación que hoy. No queda rastro de los basamentos de las pilastras, reconstruidas a principios de siglo, en su sitio, pero con cemento.



LOCALIZACION GEOGRAFICA del lugar de las ruinas de Racchi. Aunque en todo el Perú (*mapa de la izquierda*) hay ruinas pre-incaicas e incaicas, el núcleo central se halla en Cuzco, en el sur de la república. Desde el Titicaca, por las altas "punas", corría la vía de los Incas, con su empedrado regular, y llegada a la muralla que rodeaba Racchi, por el lado sur, es decir, por el actual pueblo de San Pedro, penetraba en el complejo de edificaciones.

una de ellas, que se ha conservado. Estas columnas sostenían vigas que descansaban en alvéolos del muro central y en los muros laterales, que, desgraciadamente, han desaparecido, no quedando más que la cimentación, que ha sido puesta al descubierto por las excavaciones realizadas por la misión española.

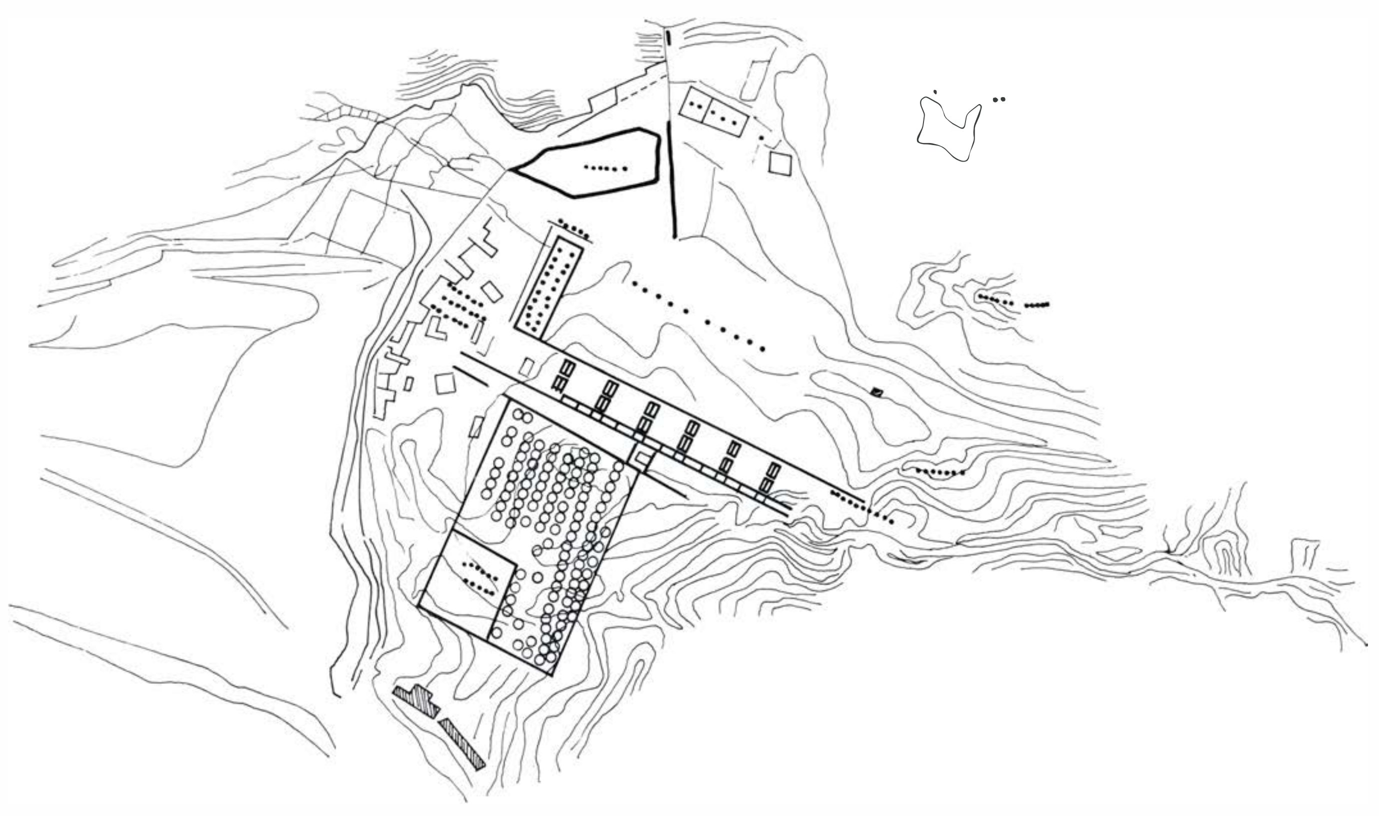
Ya sabemos cómo era este edificio. Añadamos que estaba asentado sobre un andén que proporcionó una superficie llana y horizontal, compensadora del desnivel acusado entre el de los recintos, la *pujllanapampa* de que se habla luego, y la fuente. Aunque no hay otro en el Perú que tenga estas características –muro central y pilotes a ambos lados–, el tipo de construcción larga y con techumbre de una sola inclinación o a dos vertientes es corriente, recibiendo el nombre de *kallanka* [*véase la ilustración inferior de la página 11*]. En nuestra opinión actual, esta *kallanka* no tenía fines litúrgicos ni de oración ritual o religiosa, sino que cumplía otra función, que analizaremos en las conclusiones o resumen final.

En estrecha relación con el llamado "templo" se encuentra la fila de diez patios –este es el número calculado provisionalmente, hasta que se terminen las excavaciones en cuyo entorno se agrupan seis casas, que como se aprecia en el plano [*véase la ilustración superior de la página siguiente*] son dobles, es decir, que una misma edificación contiene dos casas, sin comunicación entre ellas, que dan cada una a un patio diferente–. Tienen estas casas dos puertas y un promedio de 12 a 14 hornacinas. La regularidad de la construcción es de un rigor extraordinario, pues se tiene acceso a los patios por tres pasillos longitudinales; cada patio, por medio de las dos casas aisladas del frente, se comunica con una parcela o *chacra,* que corresponde al conjunto de las seis casas. Hemos dicho casas repetidamente, pero bien podríamos llamarlas viviendas, ya que cada hornacina, nicho o *phutu* en las edificaciones de los incas, corresponde a una alacena, donde se coloca el bulto que cada individuo lleva siempre consigo, con sus cosas [*véase la ilustración superior de la página 11*].

Si calculamos, sobre la base de diez patios, el número de éstos por seis viviendas, resultan sesenta, que, multiplicando por 12, arroja un total de 720 personas que podían habitar simultáneamente en aquel lugar. El sexto o séptimo patio, si el primero de la serie queda descubierto, se halla inmediatamente detrás de las puertas que aún se conservan del templo, es decir, en una relación de cercanía que hace suponer juiciosamente que esta proximidad no era casual, ya que, justo enlazado con estas puertas, termina uno de los pasillos laterales de los recintos [*véase la ilustración superior de la página siguiente*]. Estos recintos también se hallan en una horizontalidad lograda por medios artificiales, levantando el plano de asentamiento por medio de un andén, sobre la *Pujllanapampa,* a la que se tienen acceso desde cada patio por una abertura, con escalones a ella.

¿Para qué servían estos recintos? Las contestaciones no son fáciles, sin documentación o informaciones que nos lo digan de un modo determinante, pero se han arriesgado explicaciones. Si se admite que la *kallanka* era un "templo", sería una hospedería para peregrinos, pero en caso contrario, hay que buscar otra teoría, como veremos al final.

Las *collcas,* o *qollqas* como lo escriben ahora los quechuistas, se hallan levantadas, en número de 200 (según los cálculos del arqueólogo peruano Chávez Ballón), siguiendo con ligera desviación el eje de la *kallanka.* (Los acuerdos ortográficos de los modernos quechuólogos han variado el que establecieron los españoles, que fueron los primeros en poner con signos latinos las palabras quechuas andinas. Así, las palabras en que figura la letra "C" con incidencia sobre vocal se escriben con "Q" o con "K", y el grupo "HU" aparece con "W", con el mismo valor que en el inglés, etcétera.) Las *collcas* son construcciones circulares, de unos diez metros de diámetro y una altura calculada de 3 a 4 metros, muy derruidas las que se conservan, y muchísimas totalmente arrasadas por los campesinos, para convertir su solar en *chacra* de cultivo [*véanse las ilustraciones de las páginas 12, 13 y 14*]. La falta de techumbre y su planta circular hacen pensar en otras construcciones similares, con cubierta cónica. Su puerta estrecha apenas da paso a un hombre [*véase la ilustración inferior de la página 14*], y, por indicios, parece que tuvo dos ventanas trapezoidales junto al comienzo de la cubierta, que son más bien respiraderos de ventilación. La explicación de su finalidad práctica se conocerá, como veremos, si procura-

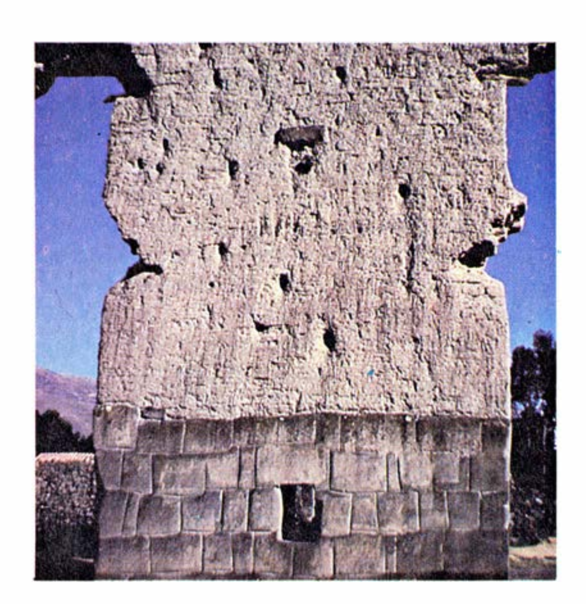


PLANO DEL COMPLEJO ARQUEOLOGICO de Racchi. En primer término, el área de las 200 collcas. Sobre ellas (en el plano), los seis patios hasta ahora conocidos de los "recintos". En ángulo recto, el llamado "templo" y a la derecha la "pujllanapampa". En la cabecera del plano, la laguna, el "manante" o fuente de los cinco caños, y el "mesapata". Las collcas siguen, con ligera desviación, el eje de la kallanka, gran edificio de 92 × 29 m.

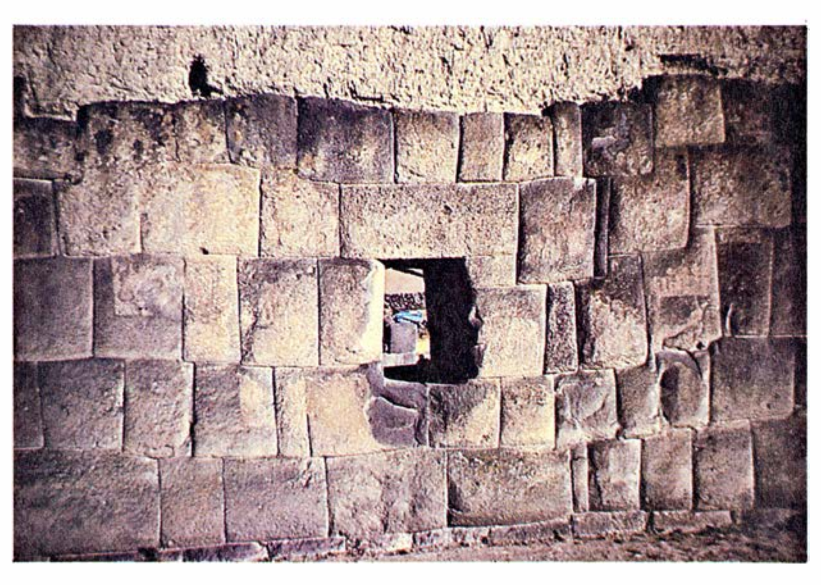
mos entender la del complejo en su conjunto. Impresiona la disposición de las *collcas* en 10 calles paralelas, tiradas a cordel.

En la parte opuesta de las *collcas* hacia los cerros volcánicos, tras los cuales está el Quimsachata, en un plano más bajo que la *Pujllanapampa*, y bajo unas estructuras de andenerías, que los campesinos del lugar –quizá por influjo de visitantes eruditos o que pretendían serlo– llaman *Mesapata* por significar algo que está sobre el nivel normal, se halla una fuente de cinco caños, que vierte sobre unas pequeñas albercas; éstas desaguan por canales que se unen en otro, que conduce a la laguna. (El sufijo *pata* designa, en quechua, "encima de", según el *Diccionario Quechua, Cuzco-Collao*, de Antonio Cusihuamán, Ministerio de Educación, Lima, 1976.)

Esta fuente o *manante*, como se la llama en el lugar, está construida en piedra y se alimenta de un canal subterráneo más grande, que tiene un aliviadero –hoy en desuso– que conduce a la base del andén en que se asienta la *kallanka*. La fotografía inferior de la página 13 nos muestra la fuente ya restaurada y con sus caños en funcionamiento. La finalidad de la fuente está clara, y es doble: por una parte es abrevadero, como lo demuestran las albercas o bebederos que tiene en dos



UNO DE LOS "MACHONES" resultantes de la fragmentación del muro continuo central de la *kallanka*. A los lados, se aprecian las huellas y el hueco donde se insertan las vigas.

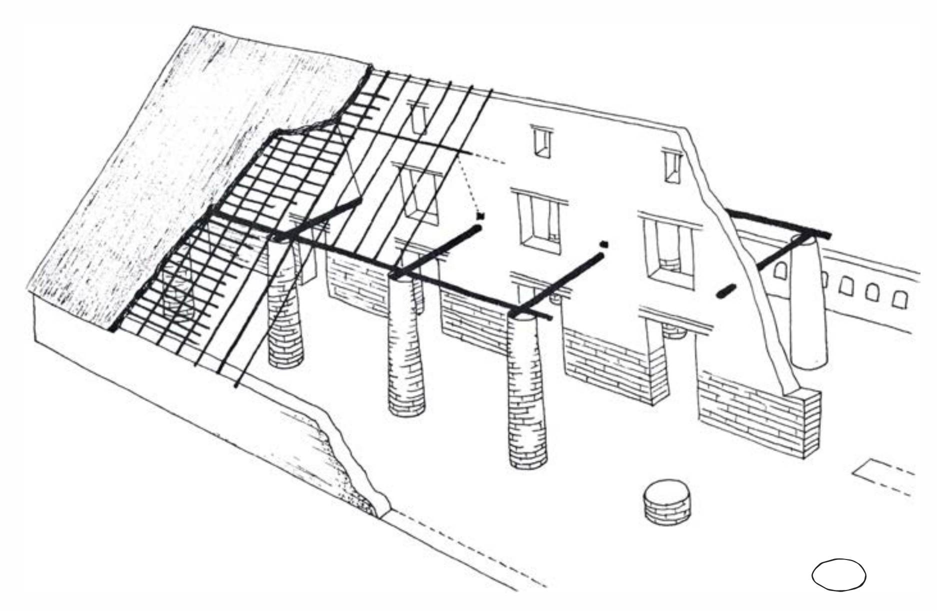


DETALLE DE LA PARTE INFERIOR de los diversos sectores del muro central. Una ventana podía servir de comunicación entre los dos lados, lo que sugiere que los trabajos en cada una de las partes eran diferenciados. El muro del "templo" tiene la base de buena cantería inca.

de sus lados, y por otra garantiza el caudal de la laguna. Esta es hoy una charca en realidad, pero esta aparente inundación, que no absorbe completamente el desaguadero hecho por los campesinos, estuvo en otro tiempo regulada por el aliviadero. Hay que observar que la finalidad de alimentar una laguna o estanque es clarísima, ya que si el caudal excedente del *manante* hubiera querido que continuara hasta el Vilcanota, era sencillísimo encauzando los canales, pero no sucede así. ¿Por qué? La pregunta quedaría sin respuesta si no supiéramos que en la parte central de la charca hay un enlosado incaico; luego fue un estanque fabricado intencionadamente, que tuvo un fin concreto. Al final volveremos sobre ello.

En el plano general de la página anterior podemos observar que existe una llanada entre el conjunto de los recintos y el *mesapata* y el manante. Esta llanada, a la que hemos hecho ya referencia, recibe el nombre de *Pujllanapampa,* que debe traducirse por "campo de juegos" (*Pukllay,* juego, *Pukllana,* juguete, según el citado diccionario, pág. 105). Si recordamos que, desde los recintos, hay una salida de cada patio, la conservación del nombre (que hoy no tiene significado, pues esta pampa se halla cortada por las cercas de las chacras campesinas actuales) nos marca concretamente la finalidad a que se destinó esta llanada: a esparcimiento de los residentes de las casas de los recintos, ya su presencia allí fuera duradera o simplemente de paso.

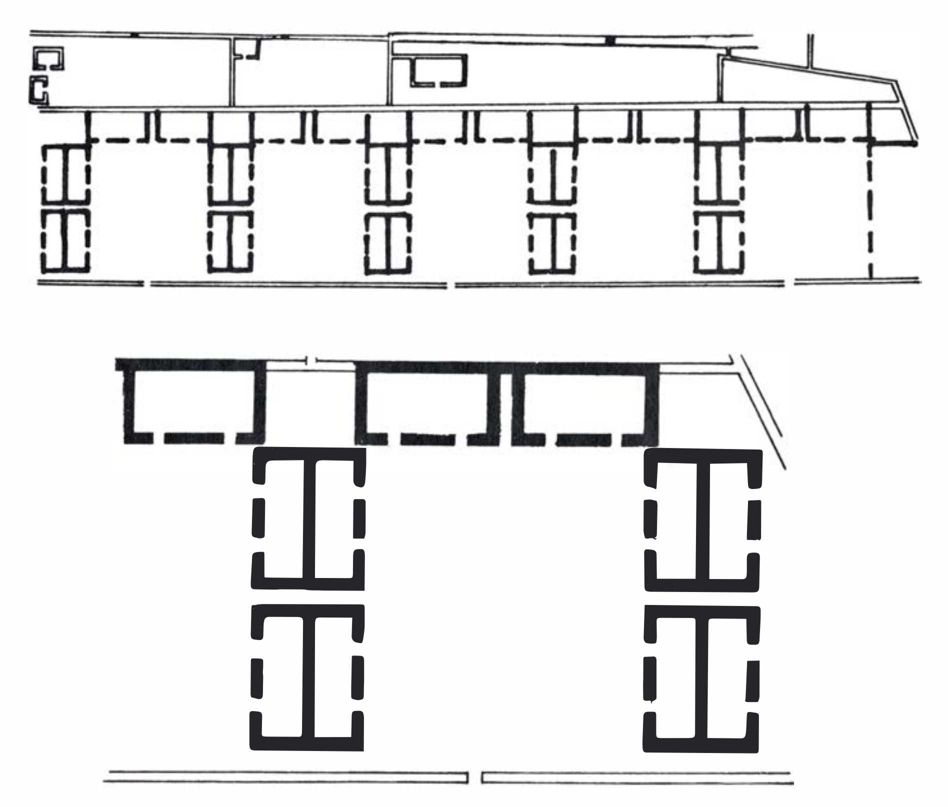
Desde el Titicaca, por las altas "punas", corría la vía de los Inkas, con su empedrado regular, y llegada a la muralla que rodeaba Racchi, por el lado sur, es decir, por la parte del actual pueblo de San Pedro, penetraba en el complejo de edificaciones. El camino descendía desde las escarpaduras volcánicas, hacia la *Pujllanapampa;* a la altura de los recintos, sin embargo, se dividía en dos, un ramal hacia las *collcas* y otro siguiendo la llanada, hasta la gran *kallanka,* para continuar por la actual placita del pueblo –donde está la iglesia campesina del siglo XIX– dirigiéndose hacia Combapata, al norte, pasando por el que hoy se denomina –nomenclatura pseudo-inca de los arqueólogos– *chasquihuasi* (casa de correos), pero en realidad, si seguimos la lista de los *tambos reales,* trazada por Huamán Poma de Ayala, es el Tambo Real de Cacha. No entra dentro de nuestro propósito ocuparnos en este momento de él.



RESTAURACION HIPOTETICA hecha por el arquitecto Graziano Gasparini en su obra citada en el texto. Supone (pues han desaparecido) que en los muros largos laterales había hornacinas, que es lo usual. Considerada la oscuridad que reinaría en el interior, cabe suponer que fueran ventanas.

Hasta aquí la descripción, con algún comentario, de lo que es el complejo arqueológico de Racchi. Pasemos ya a considerar algunos datos importantes, en estrecha relación con este hasta ahora enigmático conjunto de construcciones.

Por las noticias que hemos leído de los cronistas, todos están contestes de que en Cacha (nombre antiguo de Racchi), en el santuario, había una estatua, aunque unos dijeran que era la efigie de Viracocha, mandada colocar allí por el Inka de su nombre, en memoria de la aparición que el dios le dispensó, y otros que era el apóstol San Bartolomé. Pero el caso es que todos afirman que había un "bulto" de la estatura de hombre, con un cerquillo en la cabeza. Para entender lo que hay de concreto,



PLANO DE LA DISPOSICION DE LOS "RECINTOS": patios independientes, cuyo único punto de enlace era a través de los pasillos longitudinales. Unidades autónomas, de seis residencias, con un espacio interior (probable *chacra*) de utilización comunitaria. Cada patio tiene salida, por una puerta del muro longitudinal, a la "pujllanapampa". Recibe este nombre una llanada que se destinaba a esparcimiento.



UNO DE LOS PATIOS de los recintos y casas. De frente, el muro central que separa las dos viviendas de una misma construcción, con las hornacinas o alacenas. A la derecha, los restos de muros de las casas que cierran el patio. Las casas de Racchi tenían dos puertas y un promedio de 12 a 14 hornacinas.

hemos de pasar a una historia más reciente de hallazgos arqueológicos casuales. Esta historia reciente se remonta a la década de los años treinta de nuestro siglo.

Al estar preparando los cimientos del Teatro Municipal del Cuzco, uno de los encargados de las obras encontró una cabeza de piedra, que secretamente ofreció al archivero-bibliotecario español D. Juan Larrea –luego entusiasta peruanista y entonces mediocre poeta dadaísta– que la incorporó a su *Colección,* que exhibiría en París, Madrid y Sevilla (1935) y que luego pasó a ser propiedad del Museo de América de Madrid, donde se conserva [*véase la ilustración izquierda de la página 15*]. El mismo Larrea nos cuenta la peripecia en su libro *Corona Incaica* (Facultad de Filosofía y Humanidades, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina, 1960), y explica clarividentemente que esta cabeza correspondía a la estatua de Racchi, y que fue trasladada a Cuzco para evitar la idolatría, destruida y, para mayor seguridad, enterrada entre los cimientos de la Casa de la Compañía de Jesús, en cuyos solares se edificaría luego el Teatro Municipal.

PLANO DE LA ZONA DE *COLLCAS*, o depósitos de construcción circular, con las calles que forman. Obsérvese la estrecha vinculación de esta zona (rodeada de un cerramiento o muro) con la de los recintos.

Pero la historia no concluye con este hallazgo. En 1950, un gran terremoto asoló la sierra peruana, azotando la ciudad de Cuzco, donde especialmente sufrieron las edificaciones coloniales y modernas. Entre los monumentos afectados se contó el Teatro Municipal, cuya demolición ordenó el Ayuntamiento de la ciudad. Allí hubo durante años una *playa* de estacionamiento de automóviles, hasta que el alcalde Díaz Quintanilla –al que tanto debe la ciudad de Cuzco– pensó que esta *playa,* en la céntrica Avenida del Sol, afeaba a la villa y que había que construir allí otra cosa. Se procedió entonces a una excavación, al objeto de cimentar lo que hoy son las Galerías Turísticas, y... se halló la otra parte de la estatua –el cuerpo– identificada por el que entonces era director del Archivo Histórico de la Universidad Mayor de San Antonio Abad, Doctor Horacio Villanueva Urteaga, como complemento (el material era el mismo) de la cabeza de Madrid [*véanse las fotografías de la página 15*].

En estas comprobaciones se llegaba a lo que podríamos llamar una certeza moral, pero no arqueológicamente válida, ya que hacía falta documentación precisa que describiera cómo era la estatua, que se conservó en Racchi hasta el tiempo de la colonia española. La documentación existía, pero no había sido estimada, porque cuando se la leyó no había aparecido aún el cuerpo. Pedro Cieza de León (*Segunda parte de la Crónica del Perú*) había escrito que en 1549 pasó por Cacha y tuvo curiosidad de visitar el santuario (hago hincapié en la palabra) y observar "de visu" la estatua que allí se conservaba todavía, encerrada en un pequeño retrete de cuatro varas en cuadro. Y su descripción es reveladora. La estatua no era de un apóstol, sino indígena, con una banda sobre la cabeza (el *llautu* incaico), como el de la pieza de Madrid, y los brazos del cuerpo estaban pegados a los lados, "sobre los cuadriles", es decir, sobre las caderas, que es lo que tiene el tronco de piedra conservado en el patio del Cabildo del Cuzco, a donde fue trasladado. La identificación no puede ser más concluyente.

Ante un complejo arqueológico tan amplio y sobre el que habían llovido interpretaciones diversas, y motivado contradicciones, la tarea del excavador no era puramente la usual de poner al descubierto las ruinas antiguas, sino buscar explicaciones, con los hallazgos, de lo que fue el

funcionamiento de aquellos edificios en el tiempo en que hubo vida en ellos. Los objetivos iniciales fueron conocer lo que faltaba por descubrir y, después, analizar sistemas de construcción y la articulación de unas zonas arquitectónicas con otras.

¿El "templo" era realmente un templo? ¿Había un santuario donde Cieza vio la estatua y que –según Garcilaso– había sido destruido "hasta sus cimientos" por los españoles, en busca de las riquezas de las ofrendas? La excavación premió el tesón de la búsqueda, ya que entre el *mesapata* y el manante se encontraron los cimientos de una construcción cuadrangular, que había sido arrasada hasta sus cimientos, y que se hallaba cubierta por las tierras de cultivo modernas de los campesinos de la localidad. Las conclusiones provisionales es que el santuario, con las dimensiones dadas por Cieza de León, había sido hallado y que, por tanto, el edificio grande no era un templo, como decía Garcilaso, contradiciéndose sobre lo de su destrucción, puesto que sigue en pie su muro maestro.

La lenta proliferación de casas campesinas sobre los terrenos del área arqueológica había llegado a los límites mismos del recinto de la *kallanka,* pero pudo conseguirse que muchas de ellas fueran desmontadas, pues afortunadamente estaban en desuso o destinadas a depósitos. Quedó entonces libre todo el trazado del muro del NO del "templo". La continuación de las exploraciones pusieron de manifiesto la existencia, en la misma orientación, de dos patios más de los recintos, con la evidencia de sus cimentaciones, en idéntica disposición que en los anteriores.

Las excavaciones demostraron lo que era una presunción plausible como hipótesis: que los recintos, como era lógico, se prolongaban hasta el límite de la andenería de acceso al complejo, y que sobre sus fundamentos se levantó poco a poco, durante siglos, el pequeño poblado campesino actual.

El estudio de los sistemas de construcción es uno de los objetivos principales de la exploración arqueológica. Había que dar respuesta, en nuestra excavación, a la pregunta de cómo se habían sustentado durante cinco siglos los trozos supervivientes del gran muro central, pues pese a su ancha base de sustentación de cantería incaica, de gran grosor, el paramento continuaba de adobe hasta su altura total. En busca de esta respuesta se estudió la forma y disposición de los adobes; éstos no eran como los usuales en otras construcciones, sino que con una longitud de 1,50 metros y una anchura de 40 centímetros estaban dispuestos en sentidos contrapuestos. Así, una fila de ellos, colocada siguiendo la línea de muro, estaba debajo de otra en posición cruzada. Estos *adobones* –debemos llamarlos así por su volumen– fueron fabricados en forma de rollo, y no encofradamente, como era, y continúa siendo, usual, en la Sierra.

Aun sabido esto, quedaba por averiguar el tipo de cimentación que se había dado al muro, para que éste resistiera las convulsiones sísmicas que azotaron la sierra en 1650 y 1950. (Hay noticia de otro terremoto en 1350, lo que daría una periodicidad de 300 años para estas convulsiones sísmicas.) Como de los once trozos que quedaron del gran muro central, dos ya no existen, allí era posible excavar sin peligro para ninguno de los "supervivientes" restantes. Fue en el primero, en la zona colindante con la laguna, donde se practicó la excavación. Los resultados, sorprendentes, explican la flexibilidad que ha tenido todo el muro, para evitar –lo que hubiera ocurrido de ser rígido



LAS *COLLCAS* o depósitos están en general muy destruidos, por el aprovechamiento que de sus materiales han hecho los campesinos, probablemente desde hace más de cien años. La Misión Arqueológica Española ha reconstruido una de ellas, con sus mismos materiales, diferenciando netamente lo pre-existente y lo actual. La techumbre debe colegirse fuera cónica, de paja, como se hace todavía hoy.



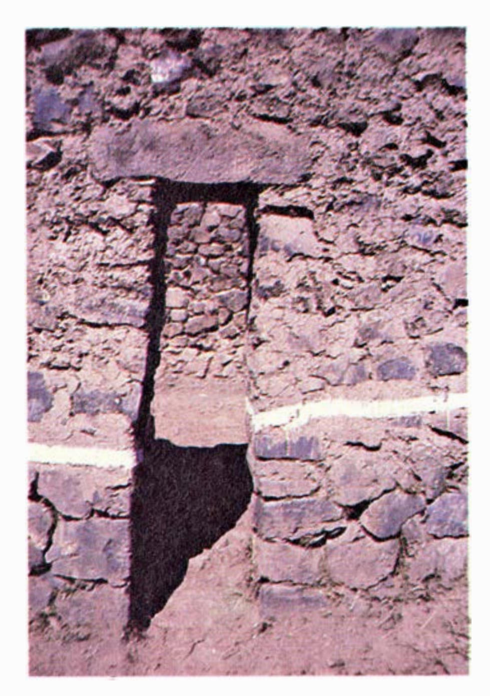
ABREVADERO, lavadero, de cinco caños. Se distingue la meseta central, por donde se hace, mediante canales o atarjeas, la distribución de aguas; en primer término, cinco chorros; a la izquierda, los otros dos. Todo de piedra finamente tallada. Esta fuente, o manante, se alimenta de un canal subterráneo.



DETALLE DE LA CONSTRUCCION DE LA CIMENTACION del muro maestro central. Arriba, piedras trabajadas, por debajo del nivel visible, sobre la línea de piedras sin tallar. (Se corresponde con las ilustraciones esquematizadas de la página 16.) A ambos lados del muro se levantaban once columnas.

desde sus cimientos– los peligros de derrumbe.

La excavación reflejó, en el pozo que se hizo, lo siguiente, del nivel del suelo hacia abajo: *1*) La primera hilada visible de los sillares estaba bien trabajada hasta este nivel, y la otra parte –enterrada– sin labrar. *2*) Grandes piedras encajadas, pero sin el preciosismo de los muros visibles; dejando huecos entre ellas, o construcción de *pirka*. *3*) Capa de *cascajo*, o lajas de piedra, finas, como lascas. *4*) Tierra, que a medida que se profundiza se humedece, para dejar una última capa. *5*) Era ésta freática, húmeda, por filtración de la laguna. En otras palabras, unos fundamentos flexibles, para compensar el desnivel del suelo natural, mas suficientes para sostener vigorosamente la pesada fábrica que construyeron sobre ellos [*véase la ilustración superior de esta misma página*].



PUERTA DE ACCESO a la *collca* restaurada, de la que se ocupó el arqueólogo Lorenzo López y Sebastián. Su estrechez sólo deja paso a un hombre, pero no a una llama, animal de transporte inca.

Dos exploraciones comprobatorias e indagatorias quedaban por realizar: conocimiento de la estructura y volumen de las *collcas* y búsqueda del santuario, si es que lo había habido, como edificación independiente del llamado "templo". El arqueólogo López y Sebastián tomó a su cargo el primero de los proyectos, habiendo limpiado por completo una de las *collcas* –la más destruida de las conservadas–; entonces procedió a su "reconstrucción", pero sin los errores de otras reconstrucciones, es decir, conservando convenientemente diferenciado lo antiguo de lo moderno, con una hilada de adobe (la construcción es, naturalmente, como se dijo, de *pirka*) pintada luego con esmalte blanco, entre lo conservado y lo añadido, como muestra la ilustración superior de la página precedente.

Todas estas operaciones, aunque delicadas, tenían la facilidad de que se trabajaba sobre ruinas visibles, pero la búsqueda del emplazamiento y posibles restos del santuario encerraba el problema de la enorme extensión del complejo arqueológico, lo que llevaba al siguiente interrogante: ¿Dónde pudo estar colocado el santuario, dentro de este gran complejo? No se trataba en este caso de una adivinanza, sino de un razonamiento lógico a seguir, partiendo de premisas lógicas también. Si Racchi fue un lugar sagrado, donde se prestaba culto con ofrendas –como indica Garcilaso al decir que fue destruido hasta sus cimientos por los españoles, en busca del oro de aquéllas–, el santuario era anterior a todo lo demás, allí construido indudablemente con posterioridad.

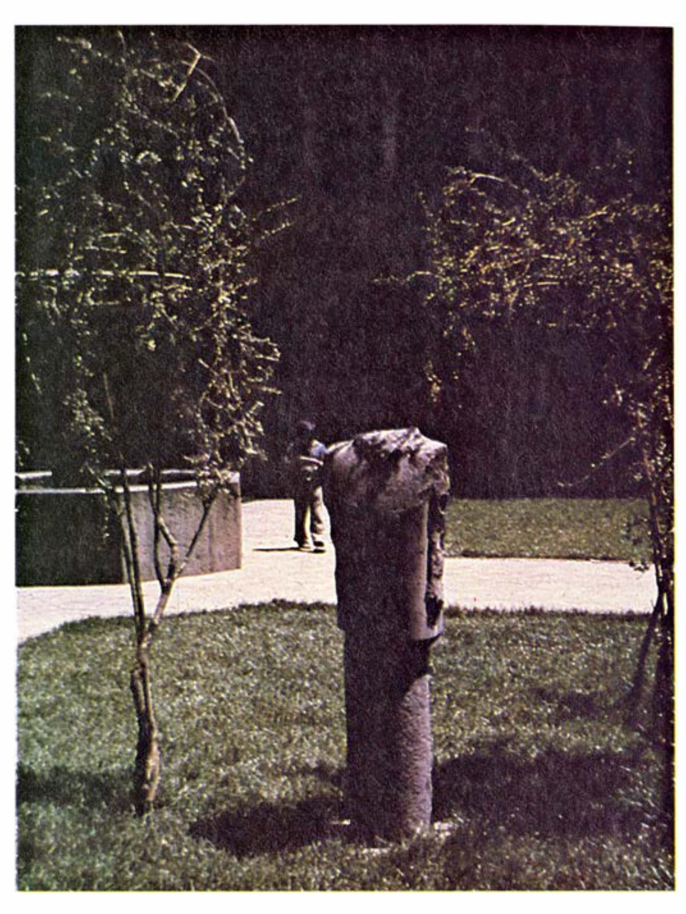
La vía incaica, que conducía desde Cuzco a Puno, enlazando a los diversos tambos reales –como el *Chasquihuasi* de que se ha hablado– y que atraviesa la *Pujllanapampa*, divide todo el campo arqueológico actual en dos partes, paralelas. En una de ellas, la cercana al volcán Quimsachata, se halla el manante surgido de una corriente subterránea. Allí y no en otro sitio, en su cercanía inmediata, entre este manante y el *mesapata* había que buscar. Afirmaba esta presunción el descubrimiento en la inmediata cercanía de dos excavaciones circulares, que no podían ser otra cosa que el basamento o suelo de dos pequeñas y paralelas *collcas*, cuyo suelo tallado en la roca se manifestaba evidente. La profesora Flor Portillo y la estudiante de arqueología Maribel Quintana cuadricularon la estrecha franja de terreno entre la fuente y el *mesapata*. Procedieron a la excavación, y justo en el límite divisorio entre el canal conductor hacia el *manante* y el canal de descarga, aparecieron los cimientos de una edificación cuadrangular, que había estado cubierta por las tierras de cultivo. Como conclusión provisional podemos decir que el lugar del santuario había sido hallado. Provisional, porque sobre el *mesapata* y detrás de él, cubiertos por edificaciones modernas abandonadas, hay indicios –ya observados por otros exploradores anteriores– de algunas edificaciones incaicas, pero cuyo trazado no coincide con las dimensiones que dan los cronistas al describir las del santuario.

Pasando ya a las conclusiones de lo que la excavación llevada a cabo permite deducir, y de los planos levantados de todo el conjunto, debemos recordar, nuevamente, a Pedro Cieza de León, cuando nos dice que Inka Viracocha hizo edificar "un pequeño cercado", donde colocó una estatua suya, que él mismo vio, y que tenía un cerquillo en la cabeza y los brazos y manos sobre los cuadriles o caderas, y que posteriormente Inka Tupac Yupanqui edificó en Cacha (Racchi) "grandes aposentos".

Reconstruyendo la historia del desarrollo y función de los edificios y ruinas hallados en Racchi, la conclusión que



CABEZA DE PIEDRA que se conserva hoy en el Museo de América de Madrid (España). Se observa sobre la frente la *mascaipacha* y sobre la oreja derecha la borla o llautu. El cuerpo se aprecia en la fotografía de la derecha.



CUERPO de una estatua (correspondiente a la cabeza de Madrid), hallada en el mismo lugar (avenida del Sol, Cuzco). Tiene los brazos sobre las caderas, "sobre los cuadriles", como describiera Cieza de León la que vio en Racchi.

surge es la siguiente, que damos como resumen de lo que hasta ahora sabemos: en Cacha edifica un santuario Inka Viracocha a su dios, junto a una fuente natural, que encauza y dota de una construcción de piedra, de cinco caños. Junto a este santuario, que es el "pequeño cercado" de Cieza, se tallan en la piedra del suelo rocoso los basamentos de dos *collcas* y se levantan éstas, para depositar en ellas las ofrendas de los fieles. Estos fieles no van en peregrinación al lugar –como algunos han supuesto–, sino que pasan por allí, siguiendo la vía imperial y dejan parte de lo que llevan, a modo de donativo, como hacen aún hoy, con piedrecitas, en sus *pacarinas*.

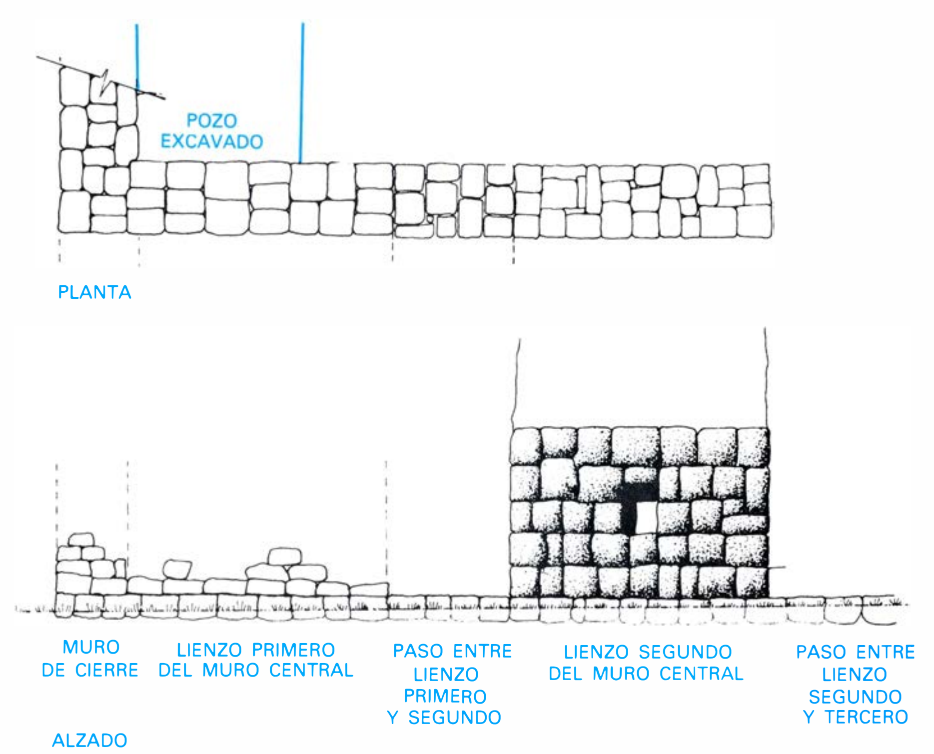
Notemos que el santuario está sólo a un kilómetro de distancia, por la vía incaica, del tambo llamado hoy *Chasquihuasi*, es decir, de una residencia preparada para los viajes de los Inkas. El sitio es excelente; está a tiro de piedra del río Vilcanota y casi a medio camino entre Cuzco y Puno, es decir, entre la capital del Imperio y la alta zona de la *Puna* y del lago Titicaca, donde se crían los rebaños de alpacas y llamas, proveedoras de las finas lanas (además de la más delicada de la vicuña salvaje) para los tejidos indispensables del vestuario cuzqueño. Es entonces cuando el emperador Tupac Yupanqui concibe hacer de aquel lugar el centro de un gran complejo industrial, ya que hay camino, agua y espacio, amén de buena tierra alfarera.

[El material cerámico que se ha recuperado en las excavaciones, consistente en fragmentos, ha mostrado dos aspectos: *1*) algunas piezas son de cerámica foránea, es decir, importada, y *2*) la cerámica dominante es de tipo imperial cuzqueño. Al no haber cementerio incaico en Racchi, por el carácter industrial del complejo, los hallazgos cerámicos y de utensilios son mucho más restringidos que en centros urbanos con necrópolis.]

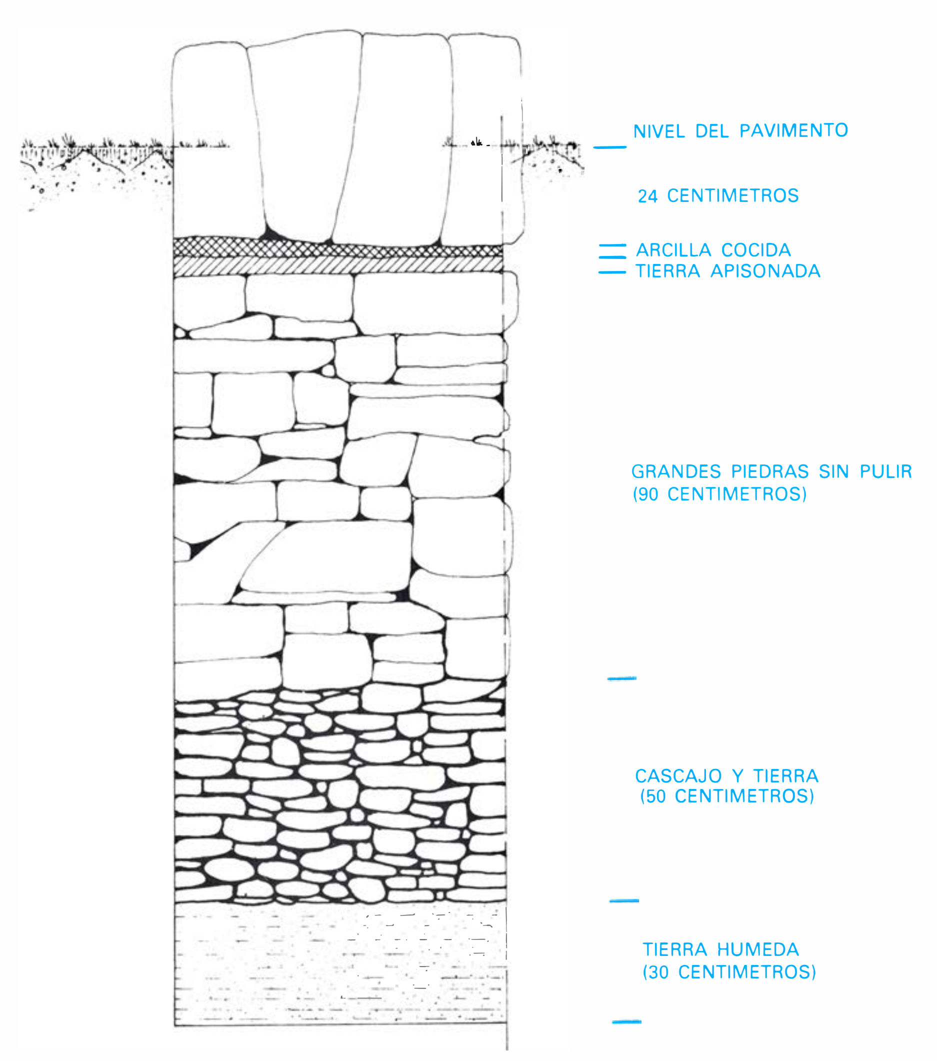
Tupac Yupanqui levanta los grandes aposentos, que constituyen una gran *kallanka* de 92 metros de longitud por 29,50 metros de anchura, donde puedan trabajar muchos operarios. Un muro central forma el eje de la cubierta, que se apoyará en once pilares a cada lado y luego en los muros. A diferencia de otras construcciones, el muro está franqueado por puertas que permiten la comunicación, y puedan estar sin embargo cerradas con pesadas cortinas, como lo demuestran los cajeos en la piedra de los muros, que facilitan la colocación de vigas para sostén de mantas o cortinas.

Queda un interrogante: ¿qué es lo que se fabricaba en esta gran *kallanka* o galpón, como la llama Graziano Gasparini? (*Arquitectura Inka*, Centro de Investigaciones históricas y estéticas. Facultad de Arquitectura y Urbanismo. Universidad Central de Venezuela. Caracas, 1977.) Una vieja tradición, conservada entre los campesinos locales, que son todos quechuahablantes, llama a este recinto *Qumbihuasi,* que significa *Casa de las finas telas,* ya que *Cumbi* era el nombre de los finísimos tejidos de las *coyas* o esposas del Inka, transparentes como de seda. Un gran taller de tejidos. Pero las lanas necesitan ser lavadas y, para ello, a unos metros de la *kallanka* se acondicionó el estanque o lagunita –hoy charca de bordes imprecisos– con su pavimento pétreo.

Pero hay que seguir con la reconstrucción del funcionamiento de la vida pasada, en tiempos incaicos, en este centro polimorfo. Un taller de tales dimensiones necesita de gran cantidad de operarios, que deben estar cerca del lugar de trabajo, para ahorro de tiempo en llegar a él. La pragmática



CORTE del sistema de cimentación, de dos metros de profundidad, desde un fondo de tierra con filtraciones húmedas, hasta los bloques que sustentan el muro construido con sillares bien trabajados.



PLANTA Y ALZADO del sistema constructivo del muro maestro central del "templo". El pavimento desciende de derecha a izquierda (desde la zona de los recintos hacia la fuente), muy suavemente.

organización incaica, sabia en las concentraciones de trabajos, en busca de un mayor rendimiento, previó esta necesidad y los arquitectos imperiales organizaron la construcción de edificios que facilitaran habitación y transporte humano rápido hasta el taller. Para ello fueron construidos los recintos. Podemos conjeturar que hubo dos posibilidades de huéspedes de las seis casas de cada patio; estas posibilidades son: que los operarios fueran permanentes o que fueran transitorios, por el cumplimiento de la *mita* o servicio temporal y obligatorio de trabajo. De un modo o de otro, la convicción a que se llega es que no hubo peregrinos a centenares, que necesitaran que el estado incaico construyera para ellos unas importantes residencias –pues de este culto multitudinario nada dicen las tradiciones recogidas por los cronistas, tan minuciosos en estos aspectos–, sino que se trata de lo que venimos exponiendo: de residencias para operarios, que no debían perder ni un minuto entre la salida del sol y el comienzo de sus obligadas tareas.

Pero un *Cumbihuasi* –o Qumbiwasi– necesita lana. Las reatas de llamas traen de la puna cargamentos de lanas, o vienen ellas, juntamente con las alpacas, conducidas por sus pastores, a ser esquiladas en Cacha (hoy Racchi). Pero los rebaños son muy grandes y la lana hay que conservarla, antes de su lavado y posterior hilado y tejido. A tal fin se construyen 200 depósitos o *collcas* para almacenar la lana y, también, para guardar las artesanías cerámicas, que serán regaladas a los importantes curacas, a los funcionarios eminentes o a los generales victoriosos, como nos dicen las crónicas que era usual entre los generosos –y calculadores– monarcas Inkas.

Con este lógico razonamiento, sobre lo que pudo ser este enorme recinto de veinticuatro hectáreas, cercado por una muralla meramente simbólica, que no defensiva, pretendemos haber devuelto a Racchi la realidad de lo que fue su pasado, muy en consonancia con las estructuras económicas del imperio del *Tahuantinsuyo* o de los Inkas del Cuzco. Al desmitificarlo como lugar exclusivamente sacro, no se descarta, como hemos visto, la existencia en aquel sitio –en la zona de menos tráfico de los operarios– de un santuario, donde estuviera la estatua que el destino ha repartido entre dos continentes: la cabeza en el Museo de América de Madrid y el cuerpo en el patio del Cabildo del Cuzco.

Viroides

Estos agentes de enfermedades infecciosas están formados por cortos filamentos de ácido ribonucleico (ARN), causan varias enfermedades en los vegetales y quizás estén implicados en enigmáticas dolencias del hombre y de otros animales

T. O. Diener

Hay enfermedades infecciosas de las plantas que no pueden asignarse a ninguno de los agentes causales habituales: hongos, microorganismos o virus. Pero las plantas afligidas por esas enfermedades poseen un rasgo sobresaliente, el poder aislar, de sus tejidos, pequeñas moléculas de una forma no usual de ácido ribonucleico (ARN), que es un tipo de material genético. La presencia de estas moléculas no puede detectarse en una planta sana de la misma especie. Si se introducen esas estructuras en una planta sana, proliferan y originan los síntomas característicos de la enfermedad. En otras palabras, dichas moléculas de ARN, denominadas viroides, son el agente causante de la enfermedad en cuestión. Se trata de los agentes de enfermedades infecciosas más pequeños que se conocen.

Los viroides son, con mucho, menores y más sencillos que los virus. En tanto que un virus típico consta de material genético (ARN o ADN) rodeado por una cubierta de proteína, un viroide sólo es un filamento muy corto de ARN. Hasta la fecha, los viroides se han identificado en menos de una docena de enfermedades específicas, todas las cuales afectan a las plantas superiores, pero hay indicios de que pueden causar también enfermedades en animales, incluidas ciertas dolencias nerviosas raras que afectan a los seres humanos.

En ciertos aspectos, el descubrimiento de los viroides coincide con el descubrimiento de los virus, acontecido éste unos 75 años antes. La concluyente demostración hecha por Louis Pasteur, Robert Koch y otros, de que los microorganismos, preferentemente las bacterias, eran responsables de numerosas enfermedades infecciosas, determinó que en los años 1890-1899 se admitiese, de forma general, que todas las enfermedades infecciosas debían estar causadas por microorganismos. Las investigaciones realizadas por el ruso Dimitri Ivanovski y por el botánico holandés Martinus Beijerinck sobre una enfermedad vegetal, el mosaico del tabaco, desmintieron tal generalización al mostrar que el agente causante de la enfermedad podía pasar a través de filtros con poros suficientemente pequeños como para retener a las bacterias. Su concepto de un "virus filtrable" condujo finalmente a la identificación de partículas de virus y al reconocimiento de su papel como patógenos.

Una nueva generalización cobró poder, la de que todas las enfermedades infecciosas de vegetales y animales estaban causadas por microorganismos o bien por virus. Hasta muy recientemente, cualquier enfermedad transmisible, a la que no se pudiera asociar un microorganismo o cualquier otro agente, se la reputaba, sin mayor consideración, causada por un virus; si el virus no podía aislarse, se admitía simplemente que era demasiado huidizo o tenue para ser detectado por las técnicas disponibles. Fue la investigación de una enfermedad vegetal la que contravino también esta generalización y condujo al primer aislamiento de un viroide.

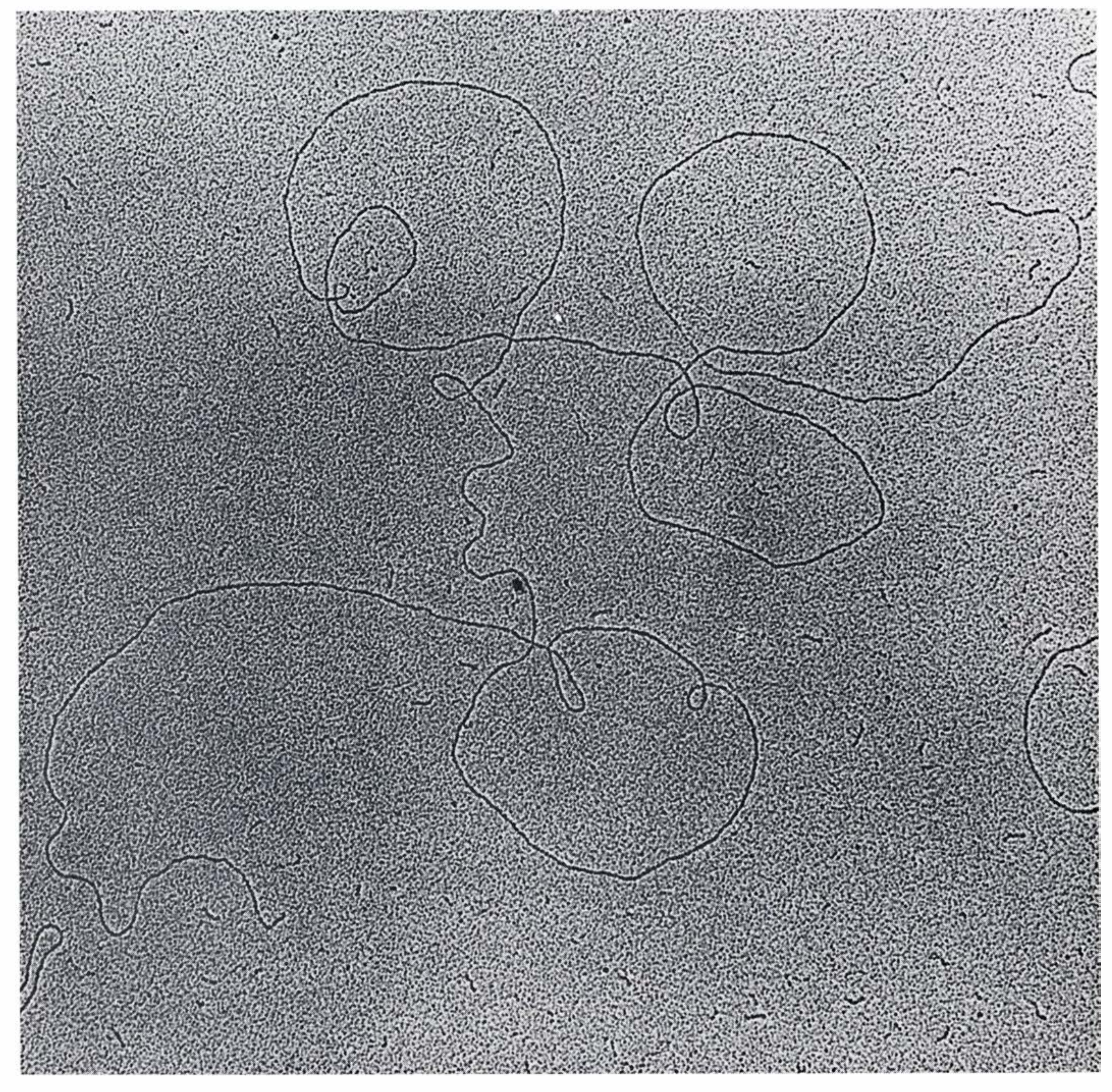
La enfermedad de los tubérculos fusiformes, de las patatas, que provoca en éstas la formación de tubérculos mayores y alargados, a veces con profundas grietas en la superficie, se advirtió por primera vez en el noreste de los Estados Unidos, en la década de 1920. Los fitopatólogos comprobaron pronto que la enfermedad era transmisible y que no había ninguna bacteria u otro microorganismo asociado con claridad a ella; y así, se dio por hecho que estaba causada por un virus. A lo largo de los años se realizaron varios intentos por aislar el supuesto virus, pero siempre sin éxito. El fracaso no sorprendió, habida cuenta de cuán difícil era aislar y purificar los virus.

En 1962, William B. Raymer y Muriel J. O'Brien, trabajando en el Centro de Investigaciones Agrícolas del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en Beltsville, Maryland, encontraron que el agente de los tubérculos fusiformes podía transmitirse de plantas de patata a plantas de tomate; en estas matas se multiplicaba y causaba síntomas característicos (hojas enanas y retorcidas) al cabo de unas dos semanas, es decir, mucho más rápidamente que en las patatas, donde la enfermedad suele manifestarse sólo cuando se han desarrollado los tubérculos. Esta observación permitió realizar experimentos sistemáticos de manera más expeditiva. Raymer vio en seguida que podía preparar extractos altamente infectivos, moliendo hojas de tomate infectadas, en una solución de fosfato. Parecía que la purificación del virus no debería presentar grandes dificultades: uno o dos ciclos de centrifugación diferencial bastarían para conseguirlo.

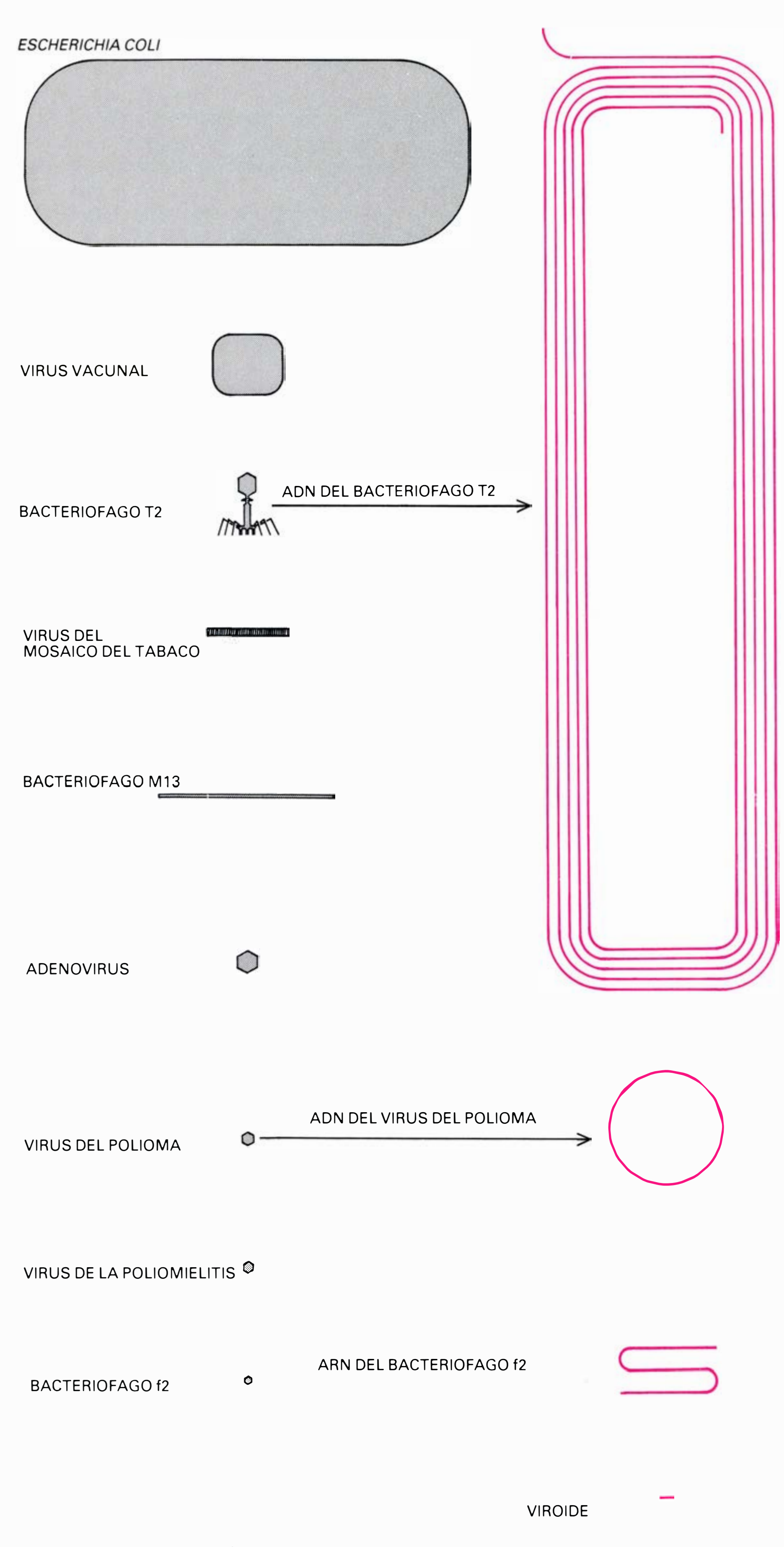
En este tratamiento, el extracto se somete alternativamente a fuerzas centrífugas moderadas y muy fuertes, utilizando una centrífuga. La centrifugación a una fuerza equivalente a 10.000 veces la gravedad tiende a sedimentar las impurezas, mientras que las partículas de un virus cualquiera permanecen suspendidas en el sobrenadante. Exponiendo el sobrenadante a una fuerza de 100.000 *g* o más, en una ultracentrífuga, la mayoría de las partículas de virus se depositan en el sedimento. El sedimento se resuspende y la suspensión se centrifuga de nuevo para eliminar más impurezas; se ultracentrifuga de nuevo para sedimentar el virus. Cuando Raymer sometió a este procedimiento sus extractos infectivos de hoja de tomate, encontró que la mayor parte del material infectivo permanecía en el líquido sobrenadante, aun después de haberlo sometido a 100.000 *g* durante cuatro horas. Es decir, el sobrenadante permanecía altamente infectivo, en tanto que el sedimento sólo lo era ligeramen-

te. Había algo extraño en este resultado y, cuando Raymer me hizo caer en la cuenta, decidimos investigar juntos el problema.

Una posible explicación, la de que el agente era un virus con un contenido tan elevado de lípidos (grasas) que su densidad era especialmente baja, había sido ya desechada: los disolventes de los lípidos no lograban inactivar el agente. Quedaba sólo una explicación alternativa: que el agente infectivo fuese notablemente pequeño. Con el fin de conseguir una mejor estimación de sus propiedades de sedimentación, volvimos a centrifugarlo en un gradiente de densidades de sacarosa, una poderosa técnica desarrollada por Myron K. Brakke, de la Universidad de Nebraska. Quedamos sorprendidos al observar que el agente infectivo no sólo sedimentaba a una velocidad más baja que la mayoría de las partículas de virus que ensayamos, sino que, además, sedimentaba más lentamente que la fracción de ácido nucleico de tales partículas. No tuvimos más remedio que sospechar que el agente sólo podría ser ADN o ARN. Tratando el material infectivo con el enzima ribonucleasa, que digiere el ARN, se inactivaba el agente. El tratamiento con enzimas que degradaban el ADN o las proteínas, por el contrario, no tenía ningún efecto ni sobre la infectividad ni sobre el comportamiento del agente durante la sedimentación. Esto significaba que el elemento esencial en la infección tenía que ser ARN y que probablemente no ha-



VIROIDES DEL TUBERCULO FUSIFORME de la patata. Son los filamentos cortos, dispersos, cada uno de unos 3,5 milímetros de longitud, que se aprecian en esta micrografía electrónica obtenida por José M. Sogo y Theo Koller, del Instituto Politécnico de Zurich. Son filamentos sencillos de ARN, pero en su forma "nativa", como aquí, poseen una conformación de círculo colapsado, o de horquilla, y que las asemeja a las moléculas de doble cadena de una anchura similar al ADN bicatenario del bacteriófago (virus bacteriano) T7, incluido aquí para proporcionar una medida de referencia. El ADN del T7 mide unos 14 micrometros (milésimas de milímetro) de longitud; el viroide nativo posee sólo unos 50 nanómetros (0,05 micrometros) de longitud.



SE APRECIA LA PEQUEÑEZ DE UN VIROIDE cuando comparamos la bacteria *Escherichia coli*, algunos virus y ácidos nucleicos del genoma de algunos virus con la forma nativa del viroide del tubérculo fusiforme de la patata (PSTV), aumentados todos ellos unos 40.000 diámetros, en estos dibujos. El ARN del virus bacteriano f2, uno de los genomas más breves, aunque suficientemente grande para dirigir la replicación independiente de su virus, es mucho mayor que el ARN viroide. Ilustración de A. Beechel.

bía ninguna proteína implicada. Otros muchos experimentos confirmaron estas conclusiones y nos convencieron de que, tanto en la mata como en el laboratorio, el ARN infectivo no estaba encapsidado, como ocurre en los virus, dentro de una cubierta de proteína. En 1967 propusimos que el agente de la enfermedad tenía que ser ARN libre.

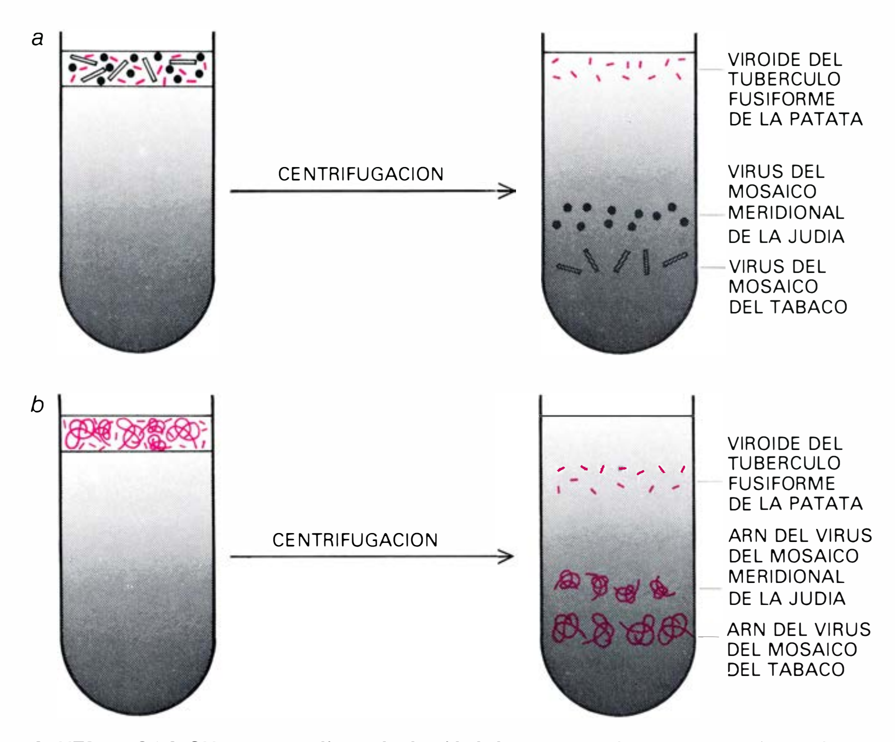
¿Cuán pequeña era la molécula de ARN infectivo? Resultaba difícil predecirlo, porque la baja concentración de ARN en el tejido infectado obligaba a detectarla de manera indirecta, observando su actividad biológica: su capacidad para dar origen a los síntomas característicos cuando se frotaba sobre las hojas de plantas de tomate. Tampoco bastaba con conocer la velocidad de sedimentación del ARN. Moléculas de ácido nucleico de igual tamaño pueden sedimentar a velocidades muy diferentes, según sean mono- o bicatenarias y tengan una conformación más o menos compacta. Nos encontrábamos muy lejos de conocer estas características estructurales del agente del tubérculo fusiforme.

Sólo después de combinar datos procedentes de la sedimentación en gradientes de densidad y de electroforesis en gel logré, con la ayuda de Dennis R. Smith, calcular el tamaño del ARN del tubérculo fusiforme. La ventaja de la electroforesis en gel estriba en que las moléculas de ácido nucleico, que están cargadas negativamente, se desplazan hacia el polo positivo de un campo eléctrico. La preparación que se va a analizar se coloca en un pocillo practicado en un extremo de un gel de poliacrilamida y, cuando se aplica una corriente eléctrica, las distintas moléculas se separan por tamaños al desplazarse, a través del gel, a una velocidad inversamente proporcional al logaritmo de su peso molecular; al cabo de cierto tiempo se forman una serie de bandas, cada una de las cuales representa un conjunto de moléculas del mismo tamaño. De ordinario, las bandas pueden visualizarse mediante tinción; luego se calcula el peso molecular del material que hay en cada banda, midiendo la distancia que hay desde el origen o desde bandas de moléculas identificables, cuyo tamaño se conoce. La pequeña cantidad de agente del tubérculo fusiforme presente en nuestras muestras no podía apreciarse por tinción; seguíamos, pues, dependiendo de su actividad biológica para poder determinar su posición en los geles. Cortamos los geles en finas rebanadas y probamos en cada una de ellas su infectividad.

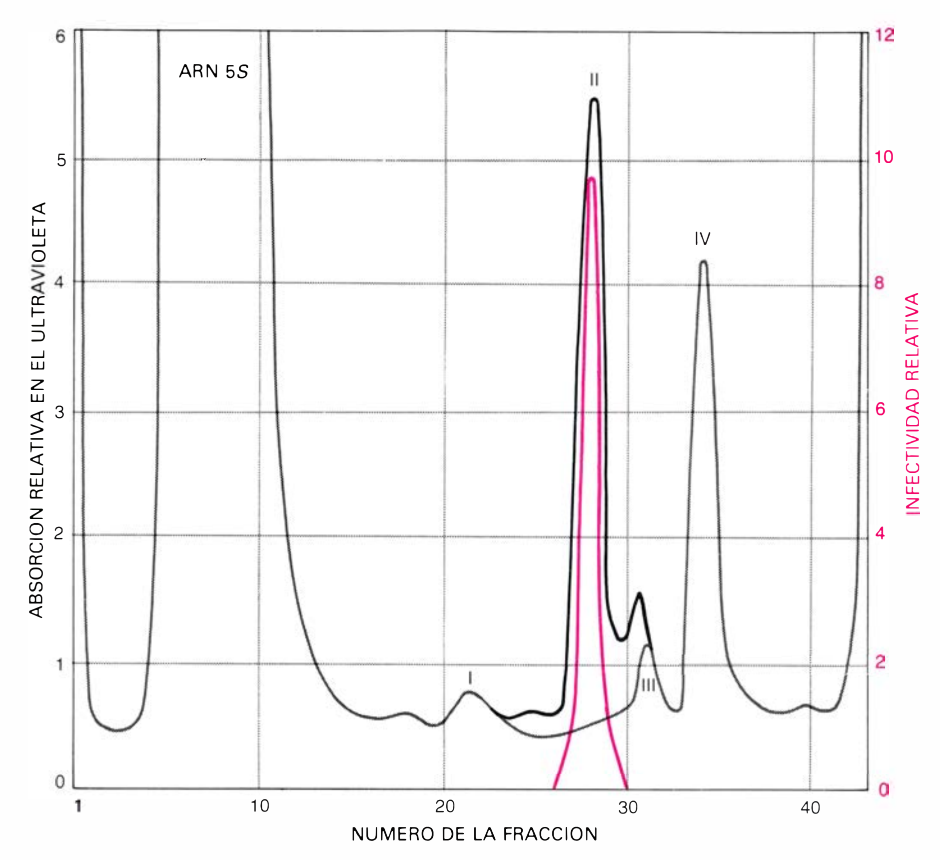
El resultado no admitía dudas: aquel ARN infectivo era realmente muy pequeño. En nuestro primer cálculo le dimos un peso molecular en torno a unos 50.000. Mediciones más precisas lo cifraron en unos 130.000. Este hallazgo planteó inmediatamente una cuestión, todavía no resuelta: ¿cómo puede un ARN tan pequeño ser un agente infectivo viable? En virología se acepta la generalización de que la mayoría de los virus tienen un genoma, o contenido total de ADN o ARN, con un peso molecular de al menos un millón. Según parece, ésta es la cantidad de ácido nucleico necesaria para que el virus se haga cargo de la maquinaria genética de la célula huésped y la desvíe para producir la proliferación del virus y codificar sus propias proteínas específicas. Un virus con menos información genética se denomina "defectivo"; no puede multiplicarse por sí mismo y depende de la información genética proporcionada por otro virus, un virus "facilitador", presente en la misma célula.

Admitimos que el ARN del tubérculo fusiforme de la patata no tenía que codificar proteínas de la cubierta característica de un virus, por lo cual podría multiplicarse con menos información genética que un virus típico. Un genoma del tamaño que nosotros habíamos calculado era sólo suficiente para codificar una proteína de un peso molecular total de alrededor de 10.000, que es inferior al tamaño de un enzima muy pequeño. Para la síntesis de su progenie, el ARN del tubérculo fusiforme tendría que depender en gran parte, si no por completo, de los enzimas preexistentes en el huésped. Esta idea, sin embargo, era difícil de aceptar, pues no se creía que las células vegetales tuviesen enzimas capaces de sintetizar ARN a partir de un molde de ARN de tubérculo fusiforme. Estas ARN polimerasas dependientes de ARN sólo se habían identificado en células infectadas por virus y, aparentemente, estaban codificadas por los genes víricos.

Parecía plausible, entonces, considerar al ARN infectivo como un virus defectivo carente de cápside, que se multiplicaba en las células vegetales con la ayuda de un virus "facilitador". Así fue como buscamos en plantas de tomate sin infectar un virus que aportase la necesaria información genética suplementaria. Todos estos esfuerzos resultaron fallidos. Llegué por fin al convencimiento de que el ARN infectivo era capaz, de alguna manera y a pesar de su pequeño tamaño, de multiplicarse al margen de cualquier virus "facilita-



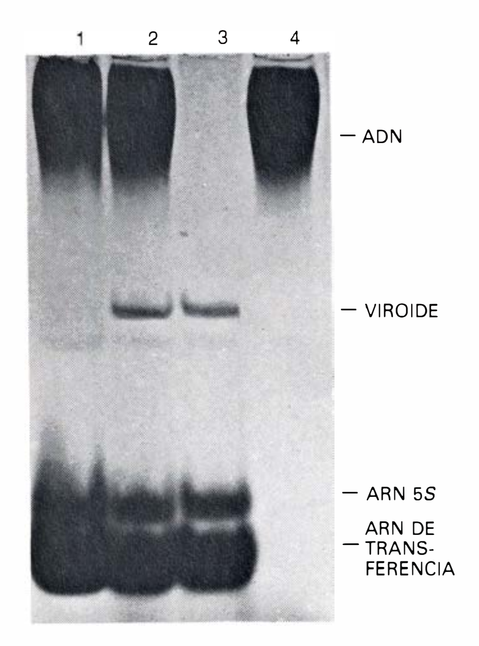
CENTRIFUGACION en un gradiente de densidad de sacarosa; el proceso mostró que el agente del tubérculo fusiforme de la patata había de ser una pequeña molécula de ácido nucleico desnudo. En el tubo de centrífuga (*a*) se depositó una capa de la mezcla del viroide y dos virus sobre una solución en la que la concentración de sacarosa aumentaba de arriba abajo. La centrifugación durante tres horas a unas 60.000 *g* separó los contituyentes, por tamaños, en tres bandas identificables mediante ensayos de infectividad; el PSTV permanecía en la parte superior del tubo. Cuando el viroide se centrifugó durante 16 horas junto con el ARN de dos virus (*b*), los ARN víricos se desplazaron hacia el fondo del tubo, pero el viroide, más pequeño, permaneció en la parte superior. Por comparación pudo deducirse su tamaño.



ARN CORTOS, procedentes de hojas de plantas sanas y de plantas infectadas, se separaron de acuerdo con sus tamaños mediante electroforesis en gel y se localizaron según la cuantía de su absorción de radiación ultravioleta. Las preparaciones, tanto de hojas sanas como infectadas, mostraron picos de absorción para un ARN ribosómico (*el ARN 5S*) y tres ARN celulares (*picos I, III y IV*). La preparación de hojas infectadas mostró también un quinto pico (*II*). La ausencia de este pico II en las plantas sanas y su coincidencia con el pico de infectividad (*color*) indicaba que debía representar al ARN viroide.

dor". Era posible que el ARN que habíamos detectado no representase una especie molecular única, sino una población de diferentes moléculas de ARN, aproximadamente del mismo tamaño, y que pudiesen ensamblarse para formar un genoma más típico. Investigamos esta posibilidad probando el efecto de la dilución y de la irradiación ultravioleta sobre la infectividad de nuestras preparaciones de ARN: en ambos casos, la pendiente de las curvas de infectividad parecía desechar toda posibilidad de que estuviesen implicadas varias moléculas diferentes. No cabía la menor duda de que el agente de la enfermedad de los tubérculos fusiformes de la patata difería en absoluto de los virus y constituía el primer representante de una recién reconocida clase de patógenos subvíricos. En 1971 propuse que a tales agentes se les denominase viroides.

Hacia 1972, Joseph S. Semancik y Lewis G. Weathers, de la Universidad de California en Riverside, mostraron que el agente del exocortis, una enfermedad infecciosa de los árboles cítricos, que se había venido considerando hasta entonces como causada por un virus, la producía un viroide. Luego, Roger H. Lawson, del centro de Beltsville, descubrió que el agente de una grave enfermedad, llamada enanismo del crisantemo, tenía propiedades semejantes a las del viroide del tubérculo fusiforme de la patata (el PSTV, del inglés "potato spindle tuber viroid"). La colaboración con Lawson me permitió establecer que el agente era, sin duda, un viroide.



EL ACIDO NUCLEICO VIROIDE pudo hacerse visible y ser identificado de forma inequívoca como ARN por electroforesis en gel. Los ácidos nucleicos de la planta del tomate se colocaron en pocillos practicados sobre la parte superior de un gel. Bajo la influencia de un potencial eléctrico emigraron hacia el polo positivo (*abajo*) a una velocidad inversamente proporcional al logaritmo de su peso molecular y, por tanto, se separaron en bandas visibles por tinción. En la muestra número 1 aparecen los ácidos nucleicos de plantas sanas; los ácidos nucleicos de hojas infectadas se revelan en las muestras números 2, 3 y 4. El viroide no se aprecia en la muestra número 1, pero sí en la número 2. No resulta afectado por la acción del enzima desoxirribonucleasa, que digiere específicamente el ADN (*muestra 3*), pero es digerido, junto a los demás ARN, por el enzima ribonucleasa (*muestra núm. 4*).

Cinco enfermedades vegetales más, por lo menos, parecen tener su causa en viroides. H. J. M. van Dorst y Dirk Peters, de la Universidad Agrícola de Wageningen, Holanda, encontraron que un viroide era el responsable de la enfermedad llamada clorosis del pepino ("cucumber pale fruit"). Para Charles P. Romain y R. Kenneth Horst, de la Universidad de Cornell, viroide era el agente de otra enfermedad del crisantemo, el mosaico del crisantemo ("chlorotic mottle"). Matsuo Sasaki y Eishiro Shikata, de la Universidad de Hokkaido, identificaron en el mismo sentido el agente de la enfermedad causante del enanismo del lúpulo ("stunt disease of hops"). John W. Randles, de la Universidad de Adelaida, halló pruebas de que ARN similares a los viroides estaban asociados al cadang-cadang, una enfermedad que produjo la muerte a millones de cocoteros y causó graves pérdidas económicas en Filipinas. Recientemente, N. A. Mohamed y Wayne Thomas, del Departamento de Investigación Científica e Industrial de Nueva Zelanda, y Peter Palukaitis y Robert H. Symons y sus colegas, de la Universidad de Adelaida, han presentado pruebas de que la enfermedad del aguacate llamada golpe de sol del avocado ("avocado sun-blotch") puede estar causada por un viroide. Indudablemente, los viroides han de aparecer implicados como agentes de más enfermedades cuya causa todavía no se conoce.

Antes de que pudiesen examinarse las propiedades físico-químicas de los viroides, era necesario separarlos de los ácidos nucleicos de las células que infectaban y, luego, purificarlos. La baja concentración del ARN viroide en los tejidos vegetales, comparada con la del ARN del huésped, dificultaba la separación y de nada servían los métodos tradicionales de purificación, aplicables a las partículas de virus recubiertas de proteína. Adoptando métodos mejorados de separación y purificación de ARN y trabajando con grandes cantidades de tejido infectado, logramos finalmente aislar viroides. Por electroforesis en gel fraccionamos los pequeños ARN presentes en extractos de hojas de tomate sanas y en hojas de tomate infectadas con PSTV; medimos luego la absorción de radiación ultravioleta de cada fracción de ARN. En el perfil correspondiente a las hojas infectadas se distinguía un prominente pico de absorción, ausente en el perfil correspondiente a las hojas sanas. Cuando se estudió en estas fracciones su capacidad de infectar plantas sanas, se vio que el pico de distribución de la infectividad coincidía, con toda precisión, con el pico único de absorción.

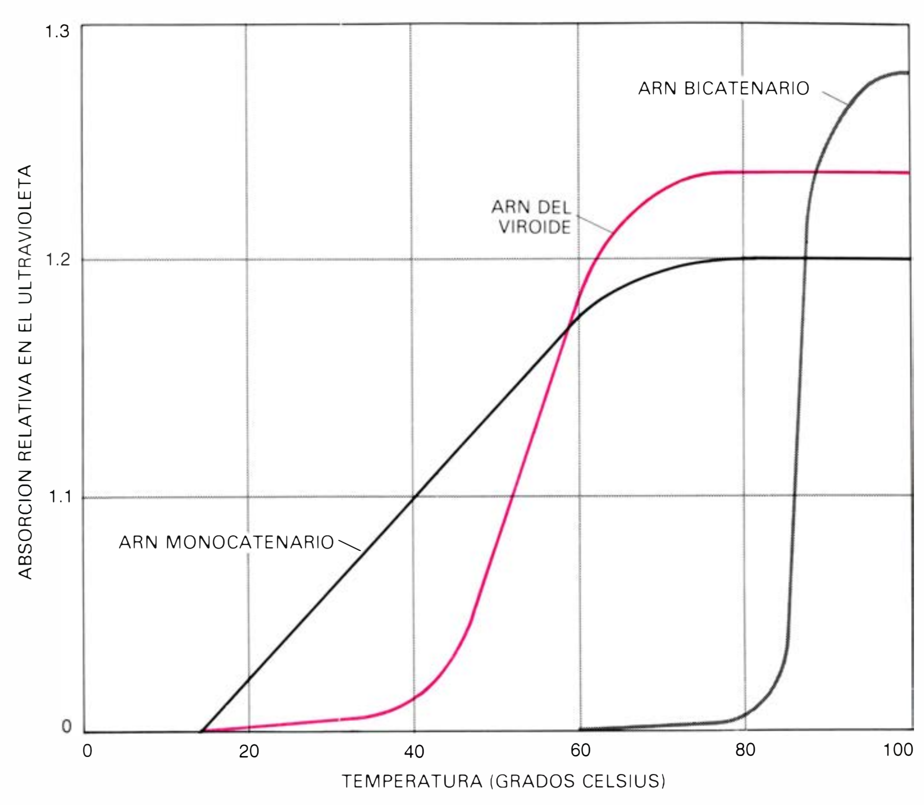
Observados en conjunto, estos datos representaban el primer reconocimiento de un viroide como una entidad física. A medida que logramos incrementar la concentración de ARN viroide, fue posible visualizar la fracción correspondiente al viroide. Formaba una banda fácil de distinguir sobre un gel tratado con un colorante que tiñe los ácidos nucleicos: la banda sólo estaba presente en los extractos infectivos y el enzima ribonucleasa la eliminaba. Para obtener PSTV esencialmente libre de ácidos nucleicos contaminantes, y cantidad suficiente para realizar análisis biofísicos y bioquímicos, procedimos a cortar la rebanada que contenía el PSTV de un gran número de geles, extraer el ARN con un solvente, volver a concentrar el ARN y someterlo a uno o dos ciclos adicionales de electroforesis.

Una vez que se dispuso de preparaciones de viroide purificado, comenzó la investigación de la estructura de la molécula infectiva. ¿Se trataba de ARN mono- o bicatenario? Ambas formas se encuentran en virus cuyo genoma está compuesto por ARN; los ARN celulares, que desempeñan varios papeles en la traducción a proteína de la información genética contenida en el genoma de ADN de la célula, son casi invariablemente monocatenarios. Algunos de los primeros experimentos (basados, por ejemplo, en la velocidad a la que se reducía la infectividad de la preparación mediante un tratamiento con ribonucleasa) habían sugerido que el viroide estaba formado por ARN bicatenario, pero los resultados obtenidos por diferentes métodos analíticos eran contradictorios. Se esperaba que la visión al microscopio electrónico de los viroides purificados permitiese medir su anchura y, de esta forma, resolver la ambigüedad. Las primeras micrografías obtenidas con éxito, tomadas de nuestras preparaciones por José M. Sogo y Theo Koller, quienes trabajaban en el Instituto Politécnico de Zu-

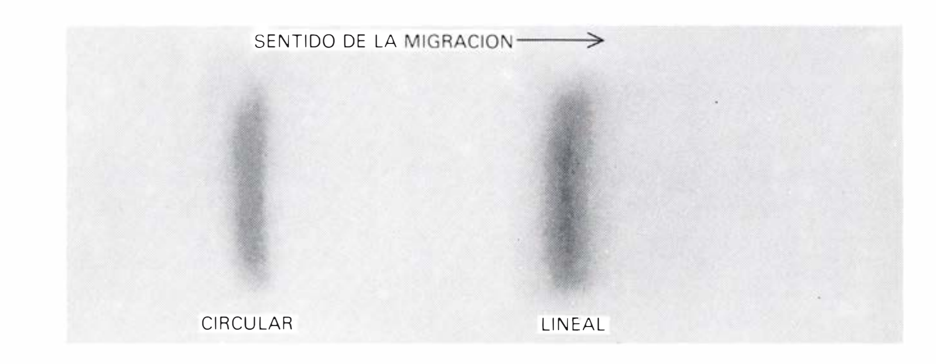
rich, mostraban una población uniforme de filamentos con una longitud media de 50 nanómetros (millonésimas de milímetro), que concordaban con nuestras primeras estimaciones del tamaño. La anchura de los viroides parecía ser igual a la del ADN bicatenario de un virus que se veía en la misma micrografía; ello sugería que el viroide era también bicatenario. Pero resultó no ser así, como descubrimos al determinar las propiedades de desnaturalización del viroide.

Resumiendo brevemente la naturaleza del ADN y del ARN, diremos que un filamento de ácido nucleico es una cadena compuesta de cuatro subunidades denominadas nucleótidos. Cada nucleótido está caracterizado por un grupo químico que se proyecta hacia fuera, denominado base. En el ADN las bases son la adenina (*A*), la guanina (*G*), la citosina (*C*) y la timina (*T*); en el ARN, las tres primeras bases son las mismas, pero la timina está reemplazada por el uracilo (*U*). Las bases son complementarias, de tal manera que, en el ARN, *A* se aparea con *U* y *G* se aparea con *C* y algunas veces con *U*. Es el apareamiento de bases complementarias, mediante la formación de enlaces de hidrógeno, lo que une a dos cadenas simples para formar una molécula bicatenaria. El apareamiento de las bases también puede tener lugar en una cadena simple: una región de una cadena puede replegarse sobre una región complementaria, originando un lazo o bucle en forma de horquilla. Las regiones unidas mediante apareamiento de bases se "desnaturalizan", es decir, se separan, cuando una molécula de ácido nucleico se calienta para romper así los enlaces de hidrógeno establecidos entre las bases complementarias; la tasa y el rango de temperaturas a las que tiene lugar la desnaturalización varían de acuerdo con la estructura de la molécula. La forma más conveniente de determinar la cuantía de la desnaturalización térmica consiste en ir midiendo la absorción en el ultravioleta de una preparación de ácido nucleico, la cual se incrementa con la desnaturalización.

Existe una curva característica que relaciona la absorción en el ultravioleta con la temperatura para un ARN monocatenario, como hay otra curva característica para el ARN bicatenario. La gráfica que obtuvimos para el ARN viroide no guardaba semejanza alguna con la de un ARN bicatenario; aunque se parecía a la curva propia de un ARN monocatenario, su pendiente era significativamente mayor. Llega-

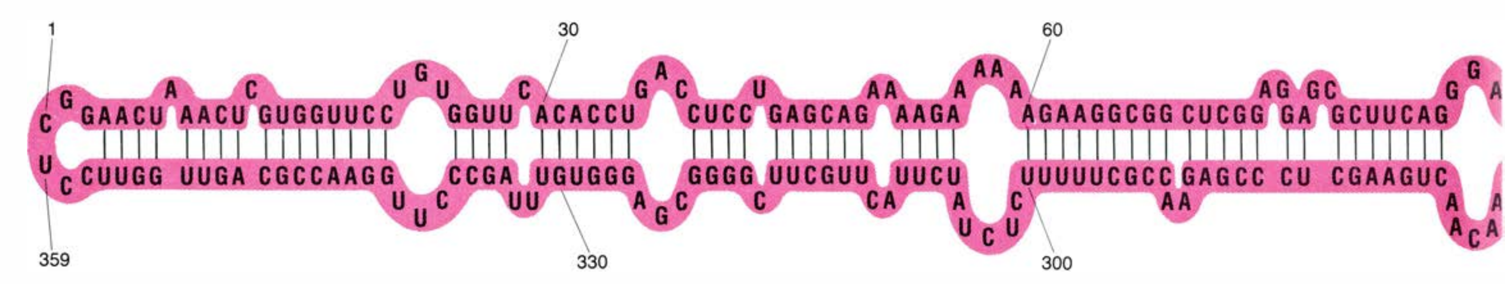


CURVAS DE DESNATURALIZACION; miden el cambio en la absorción de la radiación ultravioleta de un ARN a medida que sus regiones con bases apareadas se van separando al aumentar la temperatura. Se comparan aquí las curvas características de un ARN monocatenario y un ARN bicatenario con la del ARN viroide. Como se ve, el viroide no es un ARN bicatenario, sino un ARN monocatenario poco usual.





SE ESTABLECIO LA INFECTIVIDAD de las moléculas circulares y lineales de viroide desnaturalizando el PSTV y sometiendo dos muestras a electroforesis bajo condiciones que impedían la renaturalización. Se tiñó uno de los geles y aparecieron dos bandas de PSTV (*arriba*). La microscopía electrónica reveló la presencia de PSTV circular en una banda y PSTV lineal en la otra. Las rebanadas obtenidas del otro gel se trituraron y se ensayó su infectividad. Tanto la forma lineal como la circular resultaron infectivas.



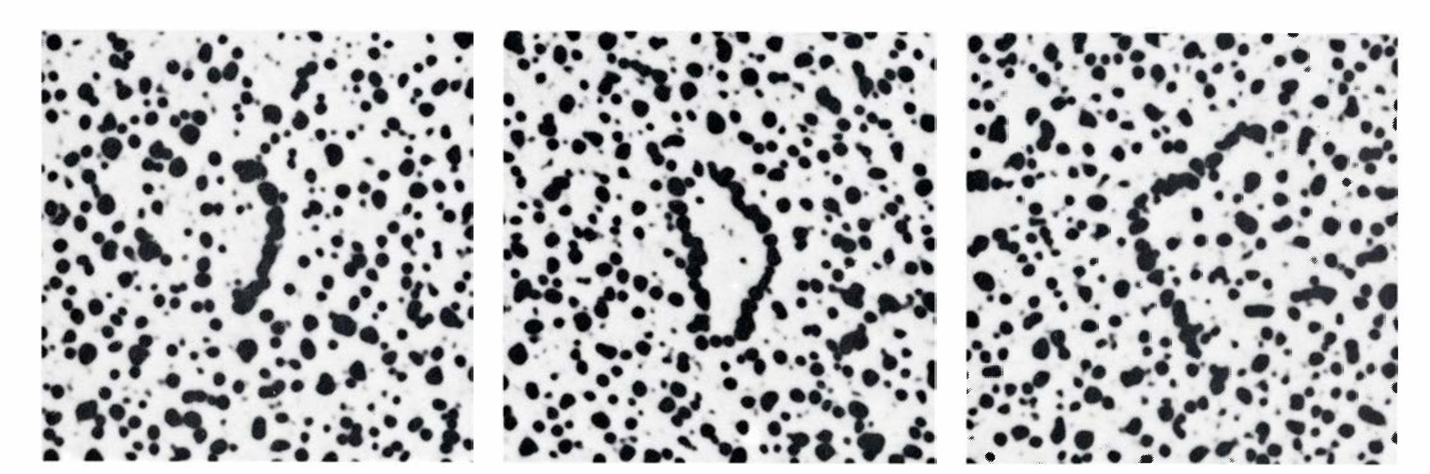
ESTRUCTURA DEL PSTV propuesta por Hans J. Gross y sus colegas, del Instituto Max Planck de Bioquímica de Munich, quienes determinaron la secuencia de 359 nucleótidos del viroide y la dispusieron de forma que el apareamiento de bases fuese máximo. Las líneas verticales representan enla-

mos a la conclusión de que, en su estado "nativo", sin desnaturalizar, los viroides constituían moléculas monocatenarias replegadas con una configuración en forma de horquilla, con amplias regiones de apareamiento intracatenario de bases. Esto explicaba por qué los viroides habían aparecido en las micrografías electrónicas como moléculas bicatenarias, y daba cuenta también de los resultados contradictorios a que llegaron los primeros experimentos. Los viroides son moléculas de ARN monocatenario, cuyo apareamiento intracatenario muestra algunas características de un ARN bicatenario.

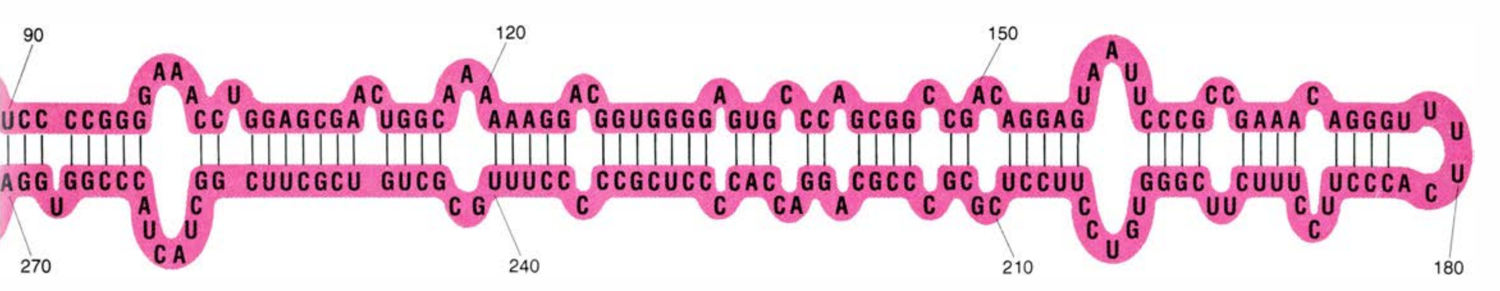
Dos grupos de investigadores lograron pronto obtener micrografías electrónicas de moléculas de viroide completamente desnaturalizadas. William L. McClements y Paul J. Kaesberg, de la Universidad de Wisconsin, comunicaron que sus micrografías del PSTV mostraban una mezcla de dos clases de moléculas: una mayoría de moléculas lineales en forma de hilos, aproximadamente dos veces más largas que los filamentos nativos, y una minoría de moléculas circulares, cuya circunferencia tenía aproximadamente la misma longitud que las lineales. Por otra parte, un grupo encabezado por Heinz L. Sänger, de la Universidad de Giessen, Alemania Occidental, hizo saber que todos los viroides eran circulares; Sänger y sus colegas postulaban que las escasas moléculas lineales que aparecían en sus micrografías eran artefactos del proceso de purificación. Pero los dos grupos estaban de acuerdo en afirmar que las moléculas circulares formaban lazos cerrados engarzados por enlaces covalentes de la cadena de nucleótidos, y que no se trataba de moléculas lineales cuyos extremos se unieran simplemente por apareamiento intracatenario de bases entre regiones complementarias de los dos extremos.

Emprendimos la tarea de averiguar si había en la naturaleza formas lineales y circulares y cuál era su exacta significación biológica en la mata. Robert A. Owens, de mi laboratorio, logró separar las moléculas lineales desnaturalizadas de las moléculas circulares, sometiendo el PSTV purificado y desnaturalizado a una electroforesis en gel bajo condiciones que impedían la renaturalización; las moléculas lineales se desplazaban más rápidamente que las circulares, de tal manera que las formas se disponían en dos bandas bien delimitadas. En colaboración con Russell L. Steere y Eric Erbe, conseguimos demostrar que ambas formas eran infectivas. Seguidamente, Ahmed Hadidi introdujo un isótopo radiactivo de fósforo en las plantas de tomate infectadas con PSTV y siguió la incorporación del isótopo en el ARN a medida que el viroide se replicaba. Tras un corto período de replicación, la mayor parte del PSTV marcado radiactivamente estaba en la forma circular y, a medida que procedía la replicación y la incorporación del isótopo, un número creciente de moléculas marcadas resultaban ser lineales. Esto confirmaba que, tanto las formas circulares como las lineales, se encontraban en las plantas infectadas. Sugería también que las moléculas circulares podían ser precursoras de las lineales.

Por aquel entonces, otros investigadores se habían propuesto también determinar la composición química de los viroides; empezaron por la técnica conocida como de obtención de huellas dactilares. El ARN se digiere con un enzima que rompe la cadena de nucleótidos por determinados sitios; los fragmentos resultantes, desde uno hasta la docena aproximada de nucleótidos, se separan en dos dimensiones, por electroforesis y cromatografía. Los fragmentos



MOLECULAS DE VIROIDE desnaturalizadas vistas en micrografías electrónicas obtenidas por William L. McClements y Paul J. Kaesberg, de la Universidad de Wisconsin. Aparecen aquí aumentadas unos 375.000 diámetros. El PSTV nativo se desnaturalizó por tratamiento con formaldehído y se preparó para microscopía bajo condiciones que impedían la reasociación de los pares de bases. Aún así, algunas moléculas de PSTV adoptaron de nuevo su estructura nativa (*izquierda*). De las moléculas desnaturalizadas, algunas eran circulares (*centro*), pero la mayoría de ellas eran moléculas lineales (*derecha*).



ces de hidrógeno entre pares de bases permisivos: *A-U, G-C* y *G-U;* la banda coloreada representa el armazón estructural de la molécula unido por enlaces covalentes. Cortas regiones de bases apareadas alternan con otras más cortas sin aparear, resultando una estructura que se asemeja al ARN bicatenario.

forman un patrón bidimensional de manchas que depende de la secuencia de bases (el ordenamiento lineal de las bases *A, G, C* y *U*) y, por tanto, difiere entre moléculas distintas. Antes de que se hubiera puesto a punto la técnica de huellas dactilares, habían surgido dudas acerca de si los viroides causantes de las distintas enfermedades eran en realidad moléculas diferentes. Elizabeth Dickson y sus colegas, de la Universidad Rockefeller, acaban de poner de manifiesto que la secuencia de bases del PSTV y la del viroide del exocortis de los cítricos divergen claramente entre sí; los dos viroides son especies distintas de ARN. A medida que se han ido analizando otros viroides, se ha hecho patente que cada uno constituye una molécula peculiar, con su propia secuencia de nucleótidos característica. Por otro lado, las diferentes cepas de un mismo viroide, como el PSTV, poseen secuencias que sólo difieren entre sí en unas cuantas posiciones a lo largo de la cadena. Tales resultados indican que los viroides son sistemas genéticos funcionales, cuyas características, al igual que las de otros elementos genéticos, están determinadas por su secuencia de nucleótidos.

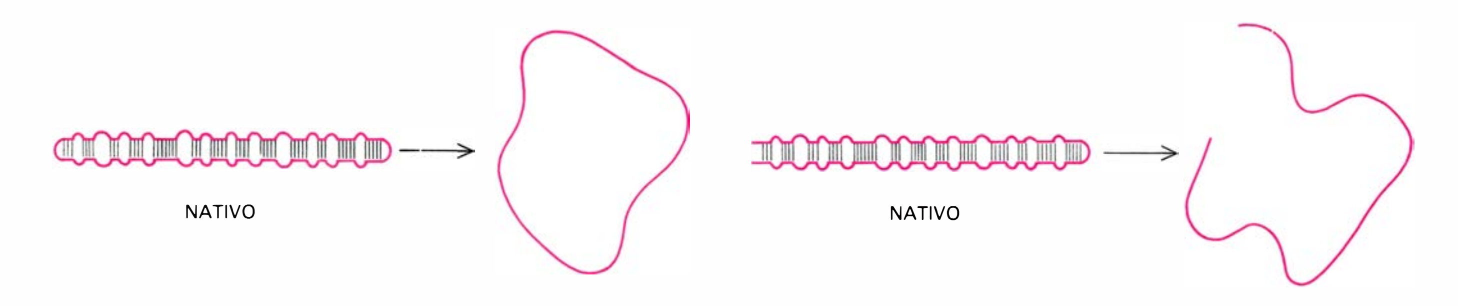
En 1978, se estableció la estructura primaria completa, es decir, la secuencia entera de nucleótidos del PSTV, por un grupo que encabezaba Hans J. Gross, del Instituto Max Planck de Bioquímica de Munich. El viroide es una cadena de 359 nucleótidos: 73 *A*, 77 *U*, 101 *G* y 108 *C*. (El exceso de *G* y *C* parece ser característico de los viroides en general, a juzgar por los cálculos de la composición de bases de especies distintas de viroides.) Gross y sus colegas propusieron una estructura secundaria, o conformación, para el PSTV nativo plegando la secuencia primaria de forma que se diera la máxima cantidad posible de apareamiento de bases y pudieran explicarse otras propiedades de la molécula, como su resistencia al ataque por las ribonucleasas.

Su modelo coincide plenamente con lo predicho a partir de observaciones físicas: un ARN monocatenario cerrado, en el que cortas regiones bicatenarias (regiones de apareamiento intracatenario) alternan con otras regiones monocatenarias (lazos no acoplados de bases sin aparear), más cortas. Se trata de una estructura hasta ahora inédita y tal vez única. No se habían observado nunca en la naturaleza moléculas cerradas, circulares, de ARN monocatenario. El elevado grado de apareamiento intracatenario de bases, que da origen a la estructura de círculo colapsado o de horquilla, es también muy rara. Resulta difícil creer que todas estas peculiaridades estructurales no guarden relación con la función biológica de los viroides.

Pero en qué estriba esa relación presumible ya es asunto borroso. El conocimiento que se tiene, a nivel molecular, de las propiedades biológicas de los viroides y en particular de cómo se replican en la célula huésped y de qué modo causan la enfermedad, es muy limitado. Con certeza sólo se sabe que, cuando un viroide penetra en una célula huésped, se replica sin la asistencia de ningún virus "facilitador".

¿Cómo induce su propia síntesis en una célula infectada una molécula de ARN tan pequeña? ¿Podría el ARN viroide codificar la fabricación de un polipéptido (una corta cadena proteica) que fuese esencial para la replicación? O bien ¿se replica el viroide utilizando solamente enzimas presentes en la planta sana? Los investigadores coinciden en que los viroides no se traducen a proteína, es decir, no actúan de ARN mensajero que codifique proteínas específicas. En el laboratorio, las preparaciones diseñadas para la traducción





ESTRECHA SIMILITUD entre la estructura de círculo colapsado de las moléculas nativas circulares (*izquierda*) y la estructura de horquilla de las nativas lineales (*derecha*) que hace imposible distinguirlas por electroforesis o en las micrografías electrónicas. Sin embargo, cuando están desnaturalizadas, la diferencia es evidente, tal como se muestra en estos dibujos esquemáticos. Las moléculas circulares desnaturalizadas pueden distinguirse de las lineales desnaturalizadas por electroforesis en gel (*véase la ilustración inferior de la página 23*) y en las micrografías electrónicas (*véase la página opuesta*).

de ARN a proteína no sólo son inactivas, sino que tampoco interfieren en la traducción de ARN mensajero genuino presente en la misma preparación. Es más, en plantas infectadas con PSTV o con el viroide del exocortis no se han hallado proteínas que no estén también presentes en las plantas sanas. La síntesis de ciertas proteínas se ve acrecentada en las plantas infectadas, pero Vicente Conejero y sus colegas, de la Universidad de Valencia, han demostrado que estas proteínas son propias del huésped y no específicas del viroide (al menos en el caso de plantas infectadas con el viroide del exocortis).

Si los viroides no se traducen, no pueden codificar enzimas. Es probable, por tanto, que su replicación dependa por completo de sistemas enzimáticos de la planta huésped. Contrariamente a lo que se creyó en principio, existen enzimas en las células no infectadas de un cierto número de especies vegetales que pueden replicar ARN sobre un molde de ARN. Estos enzimas son candidatos obvios para mediar la síntesis de nuevo ARN viroide, pero todavía no se ha demostrado su implicación en ello.

Cualquiera que sea el origen de los enzimas de la replicación, solamente pueden ensamblar un nuevo viroide sobre un molde: un ácido nucleico que tenga una secuencia de bases complementaria a la del viroide. ¿Es el molde un ARN intermediario transcrito a partir del viroide, o bien es un ADN transcrito a partir del viroide por el enzima ADN polimerasa dirigido por ARN? Habría que disponer de pruebas de la presencia de una u otra clase de molde en las células infectadas. Secuencias de ARN complementarias a un segmento del viroide del exocortis pueden encontrarse en células infectadas, pero no en células sanas, tal como demostraron por primera vez Larry K. Grill y Semancik. De momento, sin embargo, no se ha demostrado que tales secuencias complementarias representen al viroide completo, lo que presumiblemente sería necesario para proporcionar moldes viables. Por el contrario, hemos identificado algunas secuencias complementarias del PSTV en ADN procedente tanto de plantas sanas como infectadas con PSTV, pero hasta ahora nuestros hallazgos no han sido confirmados por otros investigadores. En cualquier caso, no ha habido demostración de que tales secuencias de ADN estén implicadas en la replicación del viroide.

Esta línea de investigación depende principalmente de experimentos de hibridación. ARN viroide (o ADN con la misma secuencia de nucleótidos que el viroide), marcado al objeto de que pueda reconocerse, se mezcla con un extracto de tejido de planta infectada. Bajo condiciones que promuevan el apareamiento de bases, las muestras del ácido nucleico marcado "reconocen" cualquier filamento complementario presente en el extracto vegetal y se asocian a él formando moléculas híbridas bicatenarias, que el marcaje hace reconocibles. En la mayoría de las investigaciones publicadas hasta el momento, la muestra ha sido un viroide aislado de una planta infectada, purificado en la medida que ha sido posible y marcado. Con muestras de este tipo es difícil excluir la posibilidad de que la hibridación observada resulte del apareamiento de un ARN o un ADN del huésped con algún ARN vegetal complementario que todavía contamine al viroide, y no del apareamiento con el propio viroide.

Recientemente, varios investigadores han logrado preparar muestras sintetizando cadenas de ADN complementarias a un viroide. En mi laboratorio, Owens y Dean E. Cress sintetizaron ADN complementario de casi toda la secuencia del PSTV, obtuvieron una segunda cadena de ADN, complementaria, a su vez, de la primera y empalmaron el ADN bicatenario en un plásmido (un pequeño círculo de ADN bacteriano); introdujeron luego el plásmido en la bacteria *Escherichia coli,* donde proliferó. Esta técnica de clonación molecular proporciona grandes cantidades de la muestra sin ninguna ambigüedad, y esperamos que pronto permita clarificar los mecanismos moleculares que dirigen la replicación de los viroides.

Queda todavía otra cuestión fundamental por contestar: ¿cómo producen los viroides los síntomas de enfermedad? ¿Y por qué sólo causan enfermedad en ciertas plantas susceptibles, en tanto que se multiplican en otras sin producir ningún daño apreciable? Muchos síntomas son alteraciones del crecimiento; pueden resultar, por tanto, de un desequilibrio en la actividad de la hormona del crecimiento. Sigue siendo un enigma cómo lograrían los viroides desencadenar ese desequilibrio. Los viroides se localizan predominantemente en el núcleo de las células infectadas, estructura donde se regulan los genes, es decir, donde su expresión se pone en funcionamiento o se detiene. Por ello, no es imposible que los viroides funcionen como moléculas reguladoras anormales, interfiriendo de algún modo en el control de los genes que codifican para determinadas hormonas.

De momento, sólo se han identificado viroides en plantas superiores, pero éstos (o agentes muy similares) podrían desarrollarse también en otras formas de vida. Parece razonable buscar viroides donde antes se supuso que la enfermedad estaba causada por virus y no se han identificado todavía partículas víricas. Tal es el caso de un grupo de enfermedades del cerebro, conocidas como encefalitis espongiformes subagudas. Comprenden el kuru y la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob en el hombre, el prurigo, o "scrapie", en ovejas y cabras y una encefalopatía transmisible del visón. Se ha demostrado que las cuatro enfermedades son infecciosas, pero no bacterianas. Suelen atribuirse a los denominados virus "lentos". Sin embargo, a pesar de los intensos esfuerzos realizados por muchos investigadores, no se ha podido identificar ningún virus en ellas. Se ha visto, sí, que los agentes causantes poseen propiedades desconocidas, muy raras en los virus convencionales, a saber: elevada estabilidad frente al calor, extrema resistencia a las radiaciones ultravioleta e ionizantes y una resistencia poco corriente frente a ciertos reactivos químicos.

Sobre la base de una serie de comparaciones entre las propiedades del PSTV y el agente del prurigo, propuse, en 1972, que este último también podría ser un viroide. Hasta el momento, no se ha aislado ácido nucleico claramente infectivo a partir del cerebro de animales con prurigo. Gordon D. Hunter y Richard H. Kimberlin y sus colaboradores, en el Agricultural Research Council Institute for Research on Animal Diseases, de Inglaterra, han presentado pruebas de la presencia de una pequeña molécula de ADN en tejido infectado, que no estaba presente en el cerebro de animales sanos. Recientemente, Richard F. Marsh y sus colegas, de la Universidad de Wisconsin, han probado que un componente esencial para la infección del "scrapie" puede inactivarse con desoxirribonucleasa, lo que sugiere que el agente del "scrapie" puede ser una molécula de ADN sin cubierta. Sus hallazgos no han sido todavía confirmados y se precisa una posterior caracterización del ADN. Con todo, se tiene la impresión de que los ácidos nucleicos del tipo de los viroides podrían ser responsables de enfermedades infecciosas que no sólo afectan a las plantas vegetales, sino también a los animales, incluido tal vez el hombre.

El corazón artificial

Los sustitutos mecánicos del corazón natural avanzan a paso firme. Con el tiempo, estarán listos para su implantación en los pacientes, lo que constituirá un gran adelanto, con implicaciones sociales y médicas

Robert K. Jarvik

Las enfermedades del corazón siguen cobrándose cada año un elevado número de víctimas. Por citar un ejemplo, las cifras rondan el millón anual en los Estados Unidos. Algo se ha conseguido con la mejora del tratamiento médico, el descubrimiento de nuevos fármacos y la introducción de los marcapasos. Y podría reducirse el número mucho más si la gente asumiera una mayor responsabilidad en el control de factores de riesgo probado: tabaco, ejercicio físico inadecuado, presión arterial elevada, obesidad y exceso de tensión. Esta batería de recursos terapéuticos y profilácticos se enriquecerá pronto con una nueva arma: el corazón totalmente artificial.

El futuro del corazón artificial en su totalidad se presenta hoy mucho mejor de lo que se vislumbraba diez años atrás, cuando ningún animal había sobrevivido más allá de tres días a la implantación del artefacto. El récord actual se halla en los 221 días, es decir, más de siete meses. Este récord lo detenta el corazón Jarvik-7, perteneciente a la serie de corazones artificiales que he diseñado en la Facultad de Medicina de la Universidad de Utah. Ni el Jarvik-7 ni ningún otro corazón artificial desarrollado hasta ahora está preparado para reemplazar permanentemente al corazón humano, ni siquiera de manera experimental, pero la rapidez con que progresa la tecnología permite abrigar la esperanza de que no está lejano el día en que ello sea posible.

El corazón artificial puede, en potencia, beneficiar a una población mucho mayor de pacientes que el trasplante cardíaco. En 1978 sólo 31 pacientes fueron sometidos a trasplante de corazón, mientras que, según una relación del National Heart, Lung, and Blood Institute de los Estados Unidos, se calcula que el número de pacientes que podrían recibir un corazón artificial oscila entre 17.000 y 50.000 al año. El inconveniente principal del trasplante cardíaco reside en que el número de donantes es escaso y que la tendencia del sistema inmunitario del receptor a rechazar el trasplante sólo puede superarse con grandes dificultades. Además, los medicamentos empleados para suprimir la respuesta inmunitaria aumentan el riesgo de fallecimiento por enfermedad infecciosa. El corazón artificial, en cambio, podría fabricarse en cantidad industrial para cubrir cualquier demanda. Estos "pseudomúsculos cardíacos" estarían también libres de los problemas asociados con el rechazo inmunológico, ya que se fabricarían con polímeros y metales inertes desde el punto de vista biológico.

Hasta qué punto el corazón artificial podría prolongar la vida de los pacientes nos viene sugerido por la experiencia habida en el caso de trasplantes. El 65 por ciento de las personas a las que se ha trasplantado el corazón sobreviven por lo menos un año, y aproximadamente la mitad viven 5 años o más. El 80 por ciento de estos últimos pueden hacer una vida bastante normal y el 50 por ciento puede incluso reanudar sus actividades laborales. Hay algunos, por último, que llevan ya más de diez años viviendo con un corazón trasplantado.

La idea de reemplazar la función cardíaca por un aparato mecánico no es nueva. En un principio se pensó en un corazón mecánico para sustituir sólo una parte de la circulación: perfundir con sangre ciertos órganos o tejidos. En 1812, Julien-Jean-César La Gallois señaló que "si uno pudiera sustituir el corazón por algún tipo de sistema de inyección [de sangre arterial], podría mantenerse con vida indefinidamente cualquier parte del organismo".

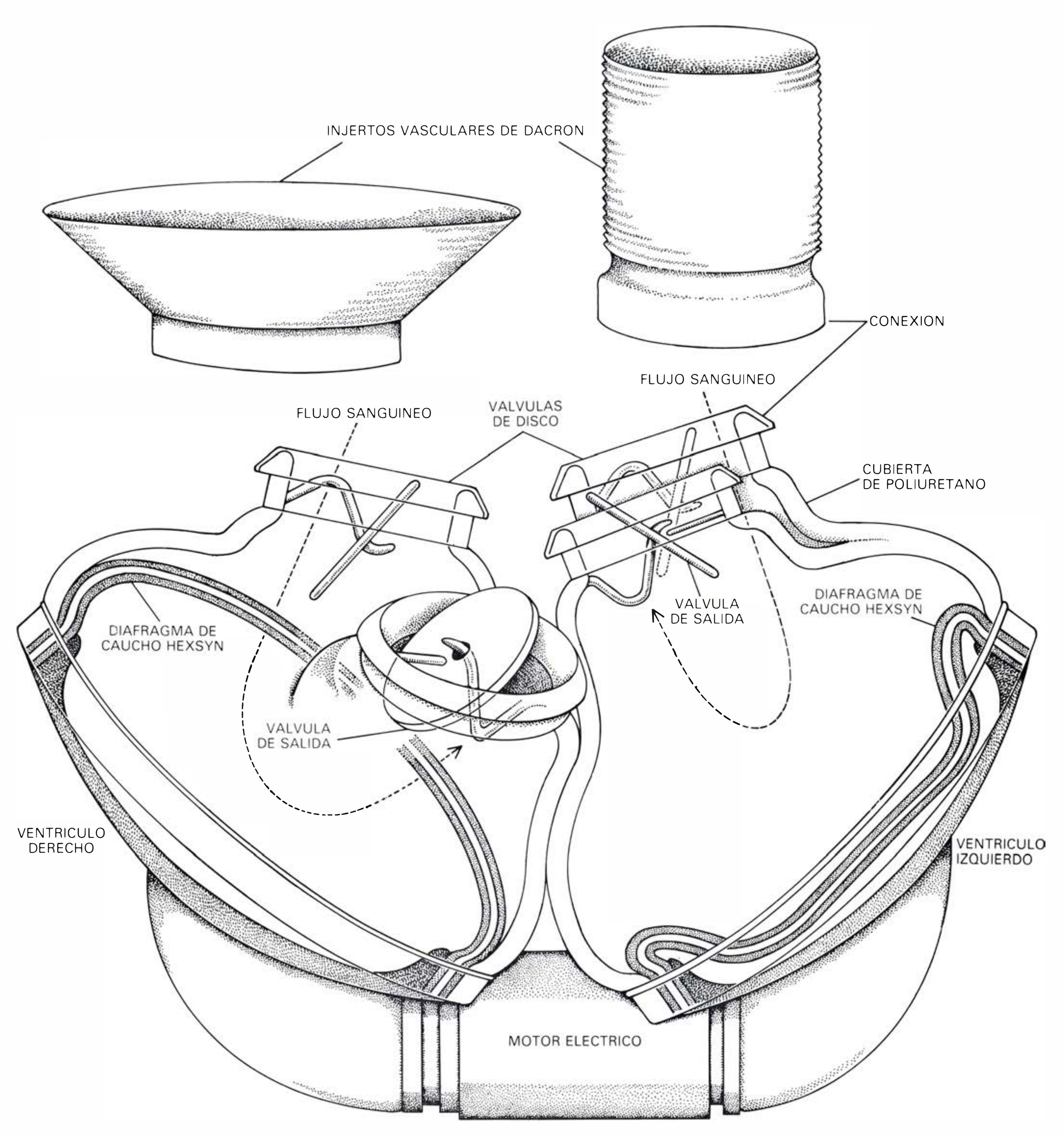
En el siglo XIX se realizaron ya muchos experimentos con perfusión mecánica; entre ellos: la perfusión de músculo en 1828 y la perfusión de un preparado aislado de corazón y pulmón por Henry Martin en 1880. (El modelo de Martin, conocido más tarde con la denominación de preparado de corazón y pulmón, supuso una contribución importante al estudio de la fisiología básica del corazón.) En 1855, dos investigadores alemanes desarrollaron un pulmón artificial. En 1920 se habían desarrollado distintos tipos de oxigenadores y había hecho acto de presencia la idea de la máquina de circulación extracorpórea. En el año 1951 se habían diseñado ya más de 30 máquinas de este tipo. Una de las que ha recibido mayor publicidad ha sido la construida en el Rockefeller Institute for Medical Research a principios de los años 30 por Charles Lindbergh y Alexis Carrel. Esta bomba de perfusión llamó la atención de los periodistas, quienes le dieron el nombre de "robot cardíaco" y "corazón de cristal". Lindbergh y Carrel sugirieron una fascinante operación que todavía no se ha puesto en práctica. "Quizás algún día", escribieron, "pueda extraerse un órgano enfermo del cuerpo y ser introducido en la bomba de Lindbergh mientras el paciente sigue en el hospital. En estas circunstancias [los órganos] podrían tratarse más enérgicamente que en el organismo, y, una vez curados, podrían reimplantarse en el paciente".

Entre los primeros aparatos merece destacarse también el diseñado, en Inglaterra, por H. H. Dale y E. H. J. Schuster en 1928. Consistía en una bomba que debía sustituir la función del lado derecho del corazón y mantener "la circulación completa en el animal sin corazón". Se proponía que la circulación evitara durante un intervalo de tiempo determinado su paso por el corazón, al objeto de poder intervenir quirúrgicamente en éste. En 1952 causó gran impacto la noticia de que se había utilizado un corazón mecánico construido por S. D. Dodrill, de la División de Investigación de la General Motors, que sustituyó la víscera natural mientras se practicaba una intervención quirúrgica que duró 50 minutos. Como se vio más tarde, sin embargo, el corazón mecánico no bastaba para poder operar

a cielo abierto, pues esta cirugía exige que los pulmones del paciente oxigenen la sangre; se hacía necesaria la creación de una máquina corazón-pulmón que suplantara a ambos órganos.

La experiencia derivada de la perfusión de órganos y de la sustitución cardíaca sugirió el paso siguiente: el reemplazo total del corazón. La meta se había fijado ahora en la instalación, en el tórax, de un mecanismo que pudiera realizar la función cardíaca para el resto de la vida del paciente. Willem J. Kolff y Tetsuzo Akutsu, de la clínica Cleveland, ensayaron ya con un corazón artificial en el año 1957. El trabajo de estos investigadores ha proseguido hasta la actualidad y se ha ampliado en otros laboratorios. Se cuenta ya con casi una docena de laboratorios (en Alemania, Argentina, Austria, China, Checoslovaquia, los Estados Unidos, Francia, Italia, Japón y la Unión Soviética) que desarrollan corazones artificiales.

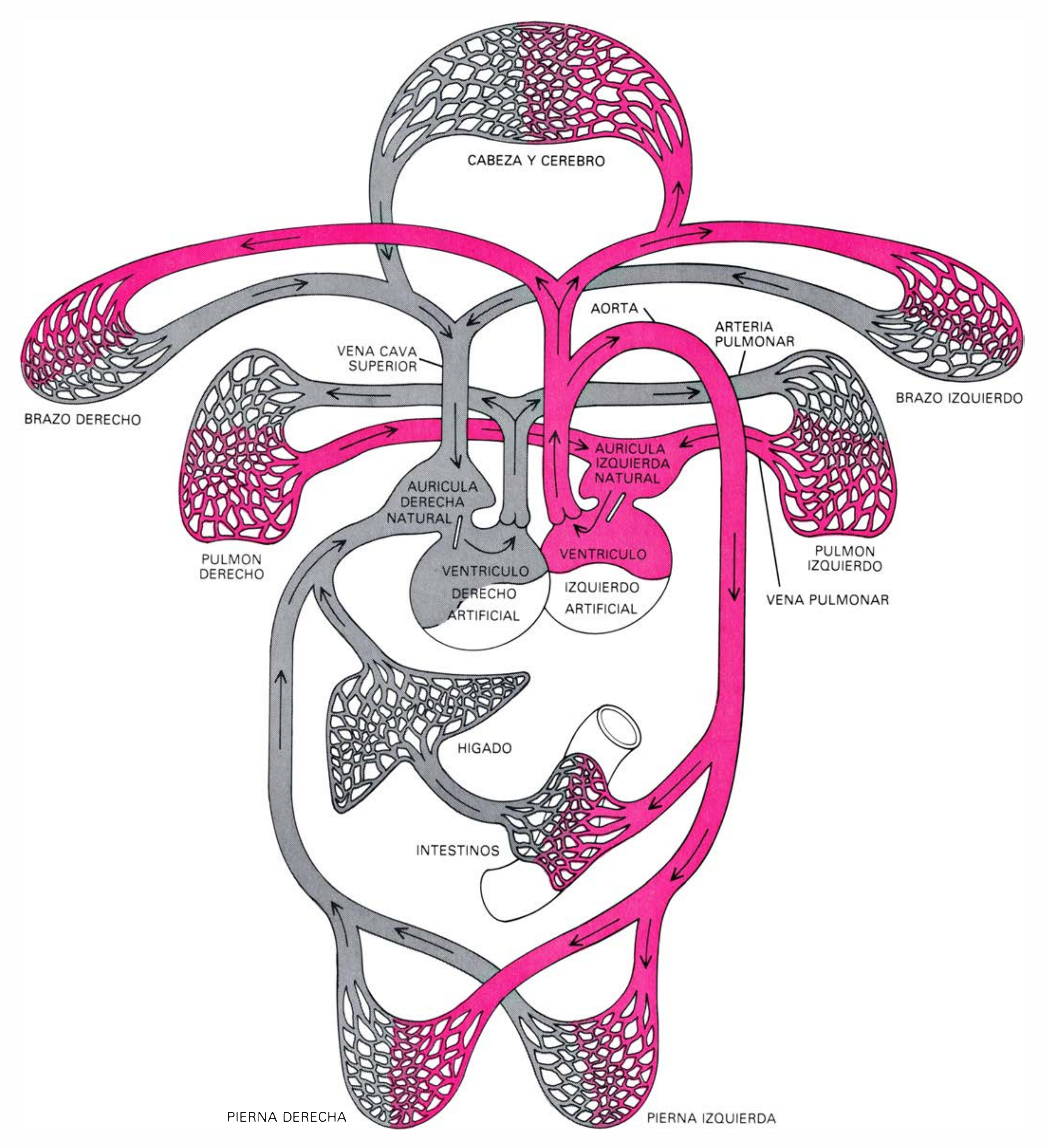
Al comenzar los primeros experimentos, se hizo evidente que habrían de cumplirse una serie de criterios funcionales. Las medidas del aparato debían adaptarse al espacio que ocupaba el corazón natural. Había que mantener un gasto (salida de sangre del corazón) adecuado para sustentar la vida



JARVIK-7, EL CORAZON ARTIFICIAL más reciente de los modelos diseñados por el autor. Aunque ajustado a la anatomía humana, se ha ensayado experimentalmente en terneros, uno de los cuales sobrevivió más de siete meses. Los ventrículos derecho e izquierdo son de poliuretano con un soporte de aluminio. Las válvulas de disco están sujetas a anillos de policarbonato. Los injertos de dacron dibujados en la parte superior sirven para conectar el aparato al sistema circulatorio. Este corazón va provisto de un motor eléctrico, hasta ahora ensayado en animales. Los corazones implantados en animales que han sobrevivido largo tiempo han utilizado un sistema de activación externo, menos problemático, pero que coarta la movilidad del sujeto.

del organismo y ser capaz de modificarlo según las necesidades de éste. Debía ser fácilmente esterilizable y resistente al desgaste. Y, lo que no era menos importante, debía bombear la sangre con la suavidad adecuada para evitar la hemolisis, la destrucción de los glóbulos rojos de la sangre. Es fácil comprender estos criterios, y otros que puedan establecerse, si tenemos presente la función del corazón natural.

El corazón natural tiene cuatro cavidades: dos aurículas y dos ventrículos. Posee cuatro válvulas: dos de ellas permiten el paso de la sangre de las aurículas a los ventrículos e impiden que lo haga en sentido contrario, y el otro par permite el paso de la sangre desde los ventrículos hasta las grandes arterias que llevan la sangre al resto del organismo. El ciclo cardíaco se divide en dos períodos: diástole (la sangre entra en los ventrículos) y sístole (se contraen los ventrículos y expulsan la sangre del corazón). Las aurículas tienen por misión almacenar la sangre que vuelve al corazón durante la sístole.



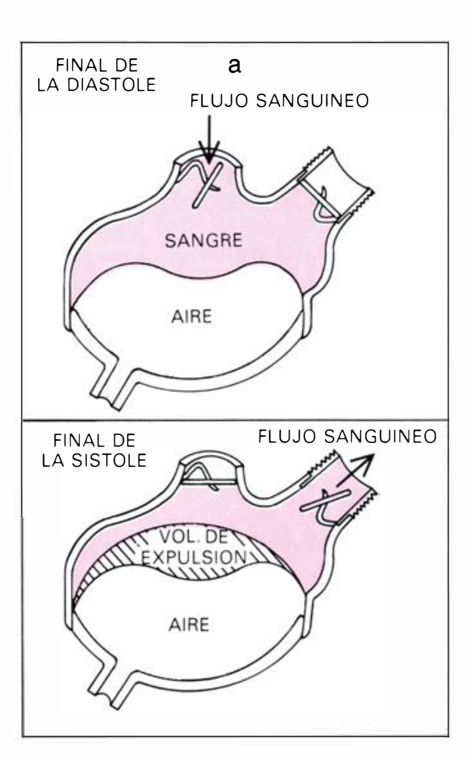
ESQUEMA DEL APARATO CIRCULATORIO, donde se indica cuál es el cometido del corazón artificial. La sangre arterial (*en color*) y la sangre venosa (*en gris*) atraviesan las aurículas, o cavidades de recepción, del corazón normal y se bombean por los ventrículos artificiales. Lo mismo que en el corazón normal, la sangre del ventrículo izquierdo se expulsa a la aorta. Después de circular por los distintos lechos capilares, a los que aporta oxígeno y sustancias nutritivas, a la vez que recoge los productos de desecho, retorna por la vena cava a la aurícula derecha. De ahí pasa al ventrículo derecho donde es bombeada a los pulmones; se desprende allí del dióxido de carbono y se oxigena. En la fase siguiente del ciclo, pasa a través de la aurícula izquierda hasta el ventrículo izquierdo, de donde es expulsada de nuevo para iniciar otro ciclo. El ventrículo izquierdo realiza un 80 por ciento del esfuerzo cardíaco.

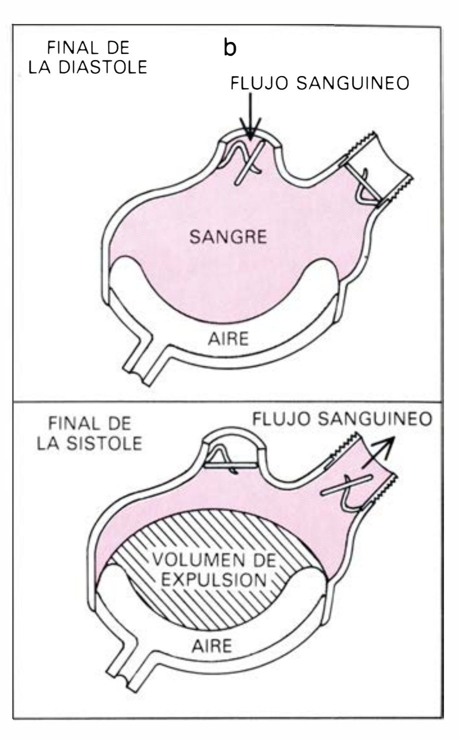
La potencia cardíaca total es de unos dos watt y medio. El 80 por ciento del trabajo lo realiza el ventrículo izquierdo, que bombea la sangre a las arterias que van a perfundir los órganos y tejidos del organismo; para ello, dicho ventrículo debe generar una presión arterial superior a los 100 milímetros de mercurio. El trabajo que realiza el ventrículo derecho es menor (alrededor de medio watt) porque expulsa la sangre a la arteria pulmonar a una presión mucho menor. La contribución energética de las aurículas es despreciable.

El volumen de sangre que bombea el ventrículo derecho debe ser aproximadamente igual al que bombea el ventrículo izquierdo, cantidad que habrá que modificar de acuerdo con las necesidades del organismo. El gasto cardíaco normal en reposo de un individuo que pese de 65 a 70 kilogramos oscila entre 5 y 6 litros por minuto. El gasto cardíaco se dobla cuando se realiza un ejercicio moderado y puede llegar a alcanzar los 30 litros por minuto cuando un atleta bien entrenado realiza un ejercicio violento. Este aumento debido al ejercicio resulta en parte de la aceleración de la frecuencia cardíaca y en parte del aumento del volumen sistólico (el volumen de la sangre expulsada en cada latido). El mecanismo responsable de la respuesta del corazón al ejercicio es de tipo indirecto. El ejercicio aumenta el volumen y la presión de la sangre que vuelve al corazón, lo que a su vez determina un aumento del gasto cardíaco. Este mecanismo regulador se denomina ley de Starling, en honor del fisiólogo Ernest Henry Starling.

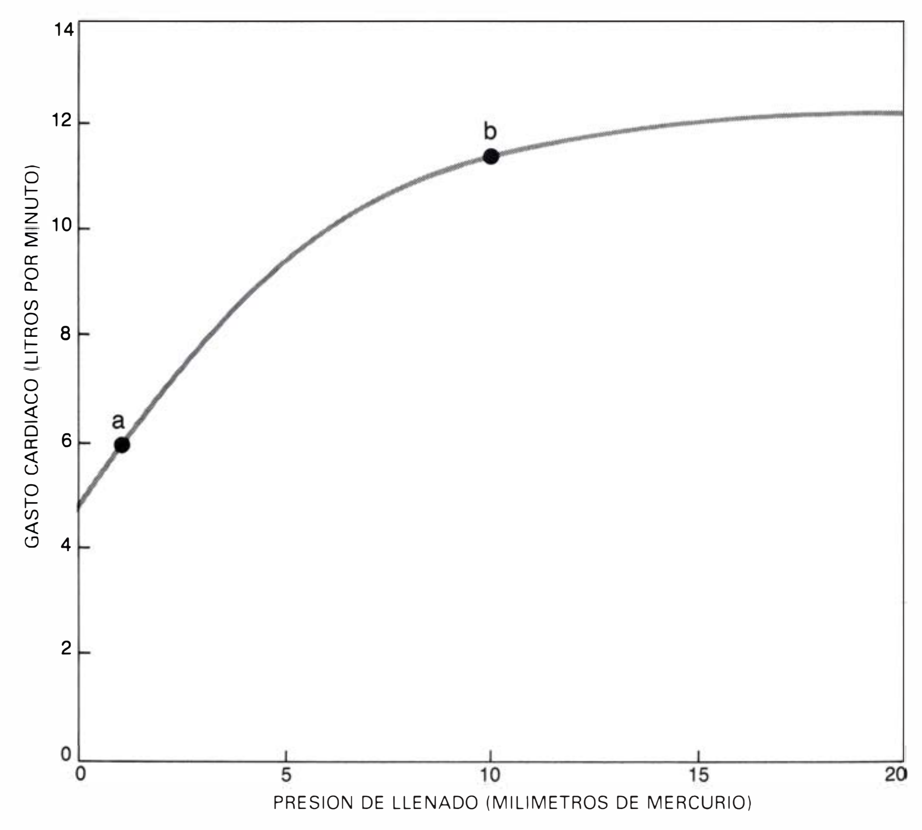
El corazón humano normal late en reposo a una frecuencia de 60 a 100 veces por minuto, más lentamente en los atletas y más deprisa durante el ejercicio. Al cabo de un año late unos 40 millones de veces. En el curso normal de una vida, el corazón late unos tres mil millones de veces y bombea unos 5 millones de litros de sangre, suficientes para llenar una manguera de jardín que rodeara la tierra por el Ecuador.

Cuando empezaron los primeros trabajos sobre el corazón artificial total, había mucha gente escéptica respecto de su viabilidad. Se tenía al corazón por un órgano extraordinario, difícil de duplicar, aunque sólo fuera en su durabilidad. Más desafiante aún aparecía la necesidad de reproducir los complejos mecanismos reguladores de la función cardíaca, que requieren una serie de interacciones entre el corazón y el sistema nervioso todavía poco comprendidas. A finales de la década de 1950 no se habían intentado aún los trasplantes





MECANISMOS REGULADORES del corazón artificial. Consiguen que el gasto cardíaco aumente cuando se acelera el retorno venoso. En el esquema se muestra un corazón artificial en dos situaciones de diástole (período de llenado) y otras dos de sístole (período de expulsión). Cuando el flujo venoso es normal (*a*), el gasto cardíaco se cifra en torno a los seis litros por minuto. Si el animal al que se le ha implantado el corazón aumenta su actividad (*b*), la presión venosa crece y el gasto cardíaco alcanza unos 11 litros por minuto. El volumen del retorno venoso al corazón depende del sistema vascular del animal, que viene regulado por mecanismos nerviosos y hormonales; el gasto cardíaco está controlado, pues, por el organismo. El aparato se limita a responder pasivamente, sin que se altere la frecuencia cardíaca, modificando sólo el volumen de expulsión (la cantidad total de sangre que se expulsa en cada latido).



GASTO CARDIACO Y PRESION VENOSA en un corazón artificial. Se cartografía la variación de uno en función de la otra en el caso en que se eleva el retorno venoso (según refleja el aumento de la presión de llenado). Los puntos *a* y *b* corresponden a las dos situaciones descritas en la ilustración superior.

cardíacos y se desconocía que el corazón pudiera autorregularse adecuadamente, incluso aislado del sistema nervioso. La cirugía a corazón abierto estaba en pañales y acababan de iniciarse los primeros trabajos sobre las válvulas cardíacas artificiales.

Los primeros experimentos con corazón artificial se hicieron en perros. En 1957, Kolff y Akutsu lograron mantener vivos a los animales durante una hora y media con un corazón de plástico de cloruro de polivinilo que iba accionado con aire comprimido suministrado desde una fuente exterior. A lo largo de los cinco años siguientes, el grupo de Kolff, de la clínica Cleveland, desarrolló e implantó otros tipos de corazón artificial regulados eléctricamente. En uno de estos aparatos empleó cinco solenoides que desplazaban un volumen de aceite; el aceite, a su vez, comprimía unas bolsas de poliuretano que contenían la sangre. Con este corazón se obtuvieron supervivencias de tres horas. En otro tipo de corazón, accionado eléctricamente, el motor movía un rodillo que comprimía un tubo conductor de sangre contra un recipiente recubierto de gomaespuma. Este corazón sólo necesitaba válvulas de salida, pero producía una hemolisis excesiva y no permitía más que supervivencias de dos horas. El llamado corazón pendular disponía de un motor eléctrico pivotante que comprimía alternativamente dos bolsas con sangre, forzando así su salida de los ventrículos. Con este dispositivo varios perros sobrevivieron entre cuatro y seis horas, pero el gasto cardíaco era inadecuado y la hemolisis excesiva.

Las técnicas quirúrgicas utilizadas en estos experimentos iniciales de implantación de corazones artificiales estaban poco desarrolladas. Por tanto, aunque la supervivencia del animal sólo fuera de pocas horas, el funcionamiento constituía de suyo un éxito. Los animales, empero, rara vez recobraban la sensibilidad tras la intervención. Los investigadores se dieron por vencidos ante las dificultades de incorporar el convertidor de energía y los mecanismos de bombeo de la sangre en el reducido espacio disponible y retornaron al empleo de aire comprimido desde una fuente exterior. Esta decisión simplificaba los aparatos a implantar en el tórax, pero no consiguieron mejorar significativamente el período de supervivencia.

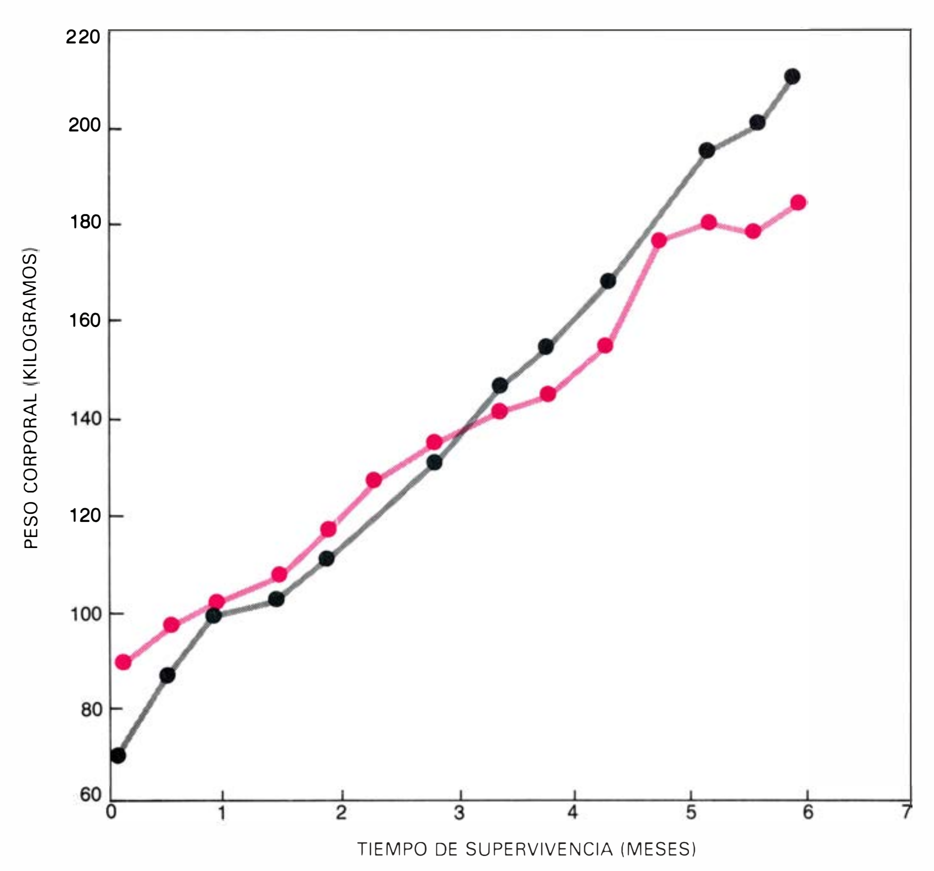
A pesar de estos resultados desalentadores, la idea del corazón artificial fue despertando gradualmente el interés de otros investigadores y organizaciones. En 1963, la NASA (National Aeronautics and Space Administration) participó en el desarrollo de un sistema de control computerizado que regulaba el gasto cardíaco del corazón artificial adaptándolo a diferentes parámetros fisiológicos, como la presión en las aurículas. El Congreso de los Estados Unidos aprobó la concesión de fondos para un programa sobre el corazón artificial dirigido por el National Heart, Lung, and Blood Institute. Siete organizaciones coincidieron en apoyar el estudio de la tecnología del corazón artificial, en la necesidad del aparato y en la valoración de los problemas implicados en su desarrollo.

Mientras tanto, proseguían en la clínica Cleveland los trabajos con animales de experimentación. A mediados de la década de 1960, Kolff y Yuke Nosé lograron mantener vivos algo más de un día terneros con corazones del tipo de bolsa. Nuevos grupos fueron incorporándose a la tarea, algunos de ellos introduciendo nuevos enfoques. Así, William S. Pierce hizo un ensayo utilizando sólo el ventrículo izquierdo; rodeaba el derecho con un cortocircuito que unía la vena cava a la arteria pulmonar y, así, la sangre pasaba directamente desde la circulación venosa a la pulmonar, sin atravesar el corazón.

En 1968, el National Heart, Lung, and Blood Institute firmó contratos con tres compañías para el desarrollo de corazones activados por energía nuclear. La Comisión de Energía Atómica financió un cuarto programa sobre corazón nuclear en el que intervenían otras dos compañías. El objetivo era obtener un corazón totalmente implantable que funcionara durante más de diez años sin ayuda externa. Todos los sistemas aprovechaban el calor procedente del isótopo radiactivo plutonio 238 para activar un motor de ciclo de Stirling, Rankine o termocompresor. Este, a su vez, accionaba una bomba de sangre por vía mecánica, hidráulica o neumática.

Hasta ahora, la suerte no le ha acompañado al corazón artificial nuclear. Los aparatos resultan complicados, de tamaño excesivo y caros. En ningún caso el corazón artificial movido por energía nuclear ha podido mantener en vida a un animal por más de dos días, aunque los motores diseñados para estos sistemas funcionaran en terneros durante un mes y las bombas construidas para este tipo artificial, pero activadas por motores eléctricos, mantuvieran con vida a terneros hasta 38 días.

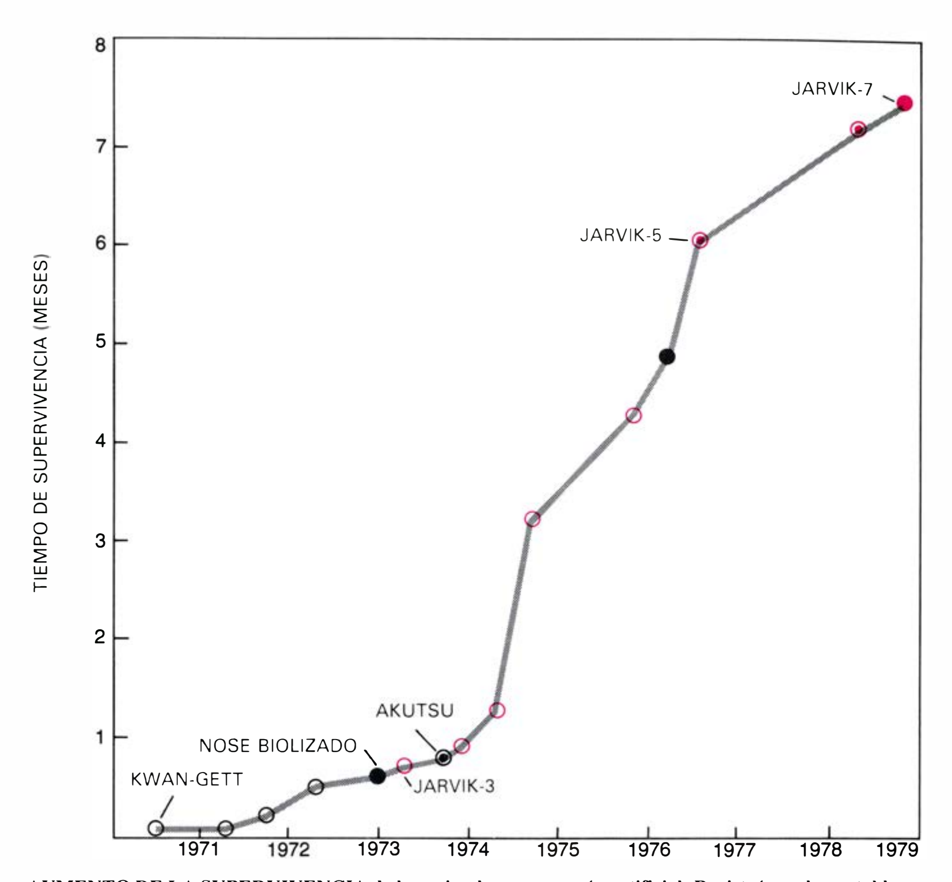
En 1969, Denton A. Cooley, del Ins-



GANANCIA DE PESO de varios terneros dotados de un corazón artificial (*puntos coloreados*) en relación con el crecimiento de un ternero control (*puntos grises*) a lo largo del mismo período de tiempo. Los datos de los terneros portadores de un corazón artificial corresponden a 11 animales en los primeros meses del ensayo. Durante los últimos meses el número de animales supervivientes era considerablemente menor.

tituto de Cardiología de Texas, implantó por vez primera un corazón artificial en un ser humano. El corazón, activado mediante aire comprimido, había sido diseñado por Domingo Liotta y Charles W. Hall. Mantuvo en vida al paciente durante 64 horas, dando tiempo a que pudiera obtenerse un corazón natural para el trasplante. Desde entonces no se han efectuado más ensayos en humanos.

En las postrimerías de la década de los 60 los logros alcanzados en el campo del corazón artificial eran todavía modestos. Los animales no sobrevivían más allá de los tres días. Persistían problemas muy graves; entre otros: la resistencia mecánica de los aparatos y la dificultad de que los aparatos se adaptaran bien al tórax, así como su consecuente tendencia a obstruir el flujo de la sangre venosa a la aurícula derecha. Por otro lado, la sangre se acumulaba en los pulmones, porque el ventrículo izquierdo artificial no funcionaba adecuadamente. En el sistema circulatorio aparecían también pequeños coágulos, que consumían los factores de coagulación hasta el punto de que había riesgo de hemorragias incontroladas en las heridas externas o internas. Los aparatos producían una hemolisis excesiva.



AUMENTO DE LA SUPERVIVENCIA de los animales con corazón artificial. Registró un alza notable en la década de los 70. La curva refleja una serie de récords mundiales establecidos por seis corazones artificiales distintos. El récord de 221 días del Jarvik-7 se logró en 1979 en la Universidad de Utah.

Todavía en 1970 se dudaba de la viabilidad del corazón artificial. Pero una serie de avances vinieron a mejorar las posibilidades futuras del ingenio. Una de las contribuciones más importantes fue el diseño de un corazón cuyo bombeo se realizaba por acción de un diafragma. Este principio fue introducido por Clifford S. Kwan-Gett, quien había trabajado con Kolff en la clínica Cleveland y se desplazó con él a la Facultad de Medicina de la Universidad de Utah en 1967. El corazón de Kwan-Gett no presentaba problemas de rotura mecánica o de hemolisis. En 1971 se consiguió una supervivencia de una semana y, al año siguiente, de dos.

Los primeros modelos de corazón de Kwan-Gett se fabricaron con caucho de silicona. Al parecer, este material provocaba una coagulación excesiva, que daba lugar a hemorragias incontroladas. Para salvar esta dificultad, se adhirieron fibras delgadas de dacron a la superficie del caucho, que mantenían inmóviles los pequeños coágulos. Se pretendía así que el interior del corazón se recubriera de una capa delgada de fibrina (el principal constituyente de los coágulos sanguíneos), con lo que dejarían de producirse los pequeños coágulos. La capa de fibrina quedaría cubierta por células endoteliales, creándose una superficie interior semejante a la del corazón natural. Las fibras mostraron su eficacia a corto plazo, pero, a la larga, la capa interna de fibrina alcanzaba tal grosor que dificultaba el llenado de las aurículas o bloqueaba el movimiento del diafragma.

Nosé abordó el problema de la coagulación de una manera distinta, desarrollando lo que denominó el corazón "biolizado". Recubría las superficies que entraban en contacto con la sangre de tejidos naturales (como pericardio), modificados por tratamiento con fijadores químicos que aumentaban su resistencia y los hacían inmunológicamente inertes. A principios de 1973, un corazón de este tipo funcionó 17 días en un ternero.

El corazón de Nosé, como otros muchos, presentaba un grave inconveniente: aparecía una insuficiencia cardíaca derecha a consecuencia de la mala adaptación del aparato artificial a la anatomía del tórax. Los vasos sanguíneos conectados al aparato tendían a acodarse, obstruyendo el llenado y comprometiendo el gasto cardíaco. Para superar esas dificultades diseñé, en 1972, el corazón Jarvik-3. Al igual que había sucedido con las mejoras anteriores, este modelo aumentó algo más el tiempo máximo de supervivencia. Al año siguiente, un grupo de investigadores, dirigido por Akutsu, que se habían desplazado a la Facultad de Medicina de la Universidad de Mississippi, realizaron un experimento en el que alcanzaron una supervivencia de 25 días. En 1974 incorporé en el corazón Jarvik-3 un diafragma muy flexible de tres capas, fabricado con poliuretano. El diafragma de los corazones precedentes tenía sólo una capa de poliuretano y se rompía con demasiada facilidad. El material que elegí para el diafragma fue el Biomerc, o licra de alta calidad, un material elástico utilizado en la confección de prendas de lencería. El corazón con el diafragma de tres capas pronto aumentó el tiempo de supervivencia hasta cuatro meses. A finales de esa década, el período de supervivencia se fue dilatando gracias a los trabajos de varios grupos: hasta cinco meses por los investigadores de la clínica Cleveland y hasta seis y medio por un grupo de Berlín occidental; finalmente, en la Universidad de Utah se consiguió en 1979 una supervivencia de 221 días con el corazón Jarvik-7.

Aunque el Jarvik-7 estaba montado para adaptarse a la anatomía humana, se implantó a modo de ensayo en el ternero, cuya anatomía difiere bastante de la nuestra. (Con mis colegas estoy experimentando ahora con corderos, que no alcanzan un tamaño corporal

superior al que corresponde al corazón diseñado.) Los dos ventrículos del Jarvik-7 son de poliuretano con un soporte de aluminio. El soporte de las válvulas de disco está formado por anillos de policarbonato. Para instalar el corazón en el animal se recurre a la circulación extracorpórea. Se extirpan los ventrículos naturales y se suturan los manguitos de poliuretano a las dos aurículas y los dos grandes vasos que conectan con el corazón. Se insertan los ventrículos derecho e izquierdo del corazón artificial en los manguitos y se conectan al sistema activador externo mediante dos tubos.

El récord de permanencia en vida se consiguió en una ternera. El corazón implantado mantuvo al animal, que, al ser intervenido, pesaba 90 kilogramos y, siete meses más tarde, 150 kilogramos. El corazón se había diseñado para una persona que pesara unos 70 kilogramos. La ternera pudo andar sobre una cinta sin fin durante una hora, a pesar de que había doblado el peso idóneo para el corazón artificial. Los análisis de la sangre del animal dieron valores normales durante la mayor parte del experimento.

Un grave problema, que se descubrió en la autopsia, fue la formación de pannus, un crecimiento incontrolado del tejido conjuntivo en los puntos de sutura. El tejido se había desarrollado en el interior de las aberturas de entrada del corazón artificial, reduciendo su tamaño y limitando el gasto cardíaco. Este fenómeno se observa raras veces en los pacientes con válvulas protésicas, por lo que es probable que la formación de pannus en las terneras esté relacionada con el rápido crecimiento del animal. Seguramente no constituirá ningún problema en las personas que lleven un corazón artificial. En la Universidad de Tokio se utiliza la cabra como animal de experimentación, no habiéndose observado la formación de pannus en animales que han sobrevivido hasta ocho meses con un corazón artificial conectado al exterior del organismo.

¿Cuánto tiempo habrá de transcurrir todavía hasta que la implantación de estas vísceras artificales en el ser humano sea un procedimiento de rutina? Habrá que esperar por lo menos una década, aunque es posible que los ensayos clínicos a pequeña escala empiecen mucho antes. Los ensayos realizados en seis laboratorios, que han mantenido animales con corazón artificial durante cinco meses o más, son muy alentadores. Dispositivos mecánicos, técnicas quirúrgicas y cuidados post-operatorios han registrado grandes avances.

Está ya demostrado que se puede fabricar un corazón artificial. Hace más de 20 años, cuando se implantó el primer corazón artificial en un animal, se suponía que funcionaba como una simple bomba mecánica y que esta función podría realizarla durante largos períodos de tiempo un dispositivo artificial apropiado. Aquellas ideas han salido del marco de la hipótesis para entrar en el de la realidad.

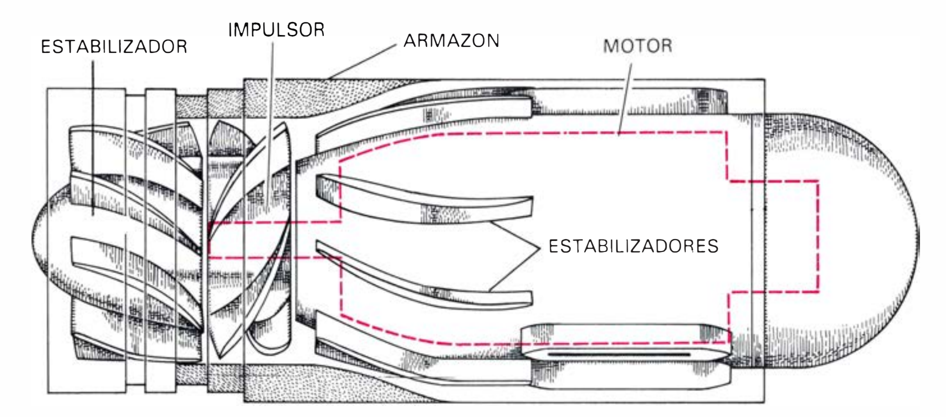
¿Por qué, pues, hay que aguardar tanto tiempo para que la implantación sea un proceso rutinario? La razón de ello tiene que ver con consideraciones de tipo ético y con el escaso dinero disponible para la investigación sobre el corazón artificial. Los modelos activados neumáticamente, que tan buen resultado han dado en los animales, no son portátiles. El animal queda confinado en una jaula y está conectado a aparatos de gran tamaño, de manera que sólo puede realizar ejercicios en la cinta sin fin. Inconveniente que no acepta de grado el ser humano. Aun cuando los sistemas compresores de aire fueran portátiles, los tubos neumáticos de gran tamaño que entran en el tórax serían muy poco confortables y acarrearían graves riesgos de infección en el punto de entrada.

Quizás algunos pacientes aceptaran esas limitaciones si no les quedara otro remedio para seguir viviendo. Pero no tiene por qué ser ésta la única alternativa. Se ha dedicado mucho esfuerzo al estudio de aparatos que ayudan al corazón natural suplementando la función del ventrículo izquierdo. Se han instalado temporalmente más de 40 de estos aparatos en pacientes con cardiopatías graves, dando tiempo a que en algunos casos sanara la cardiopatía.

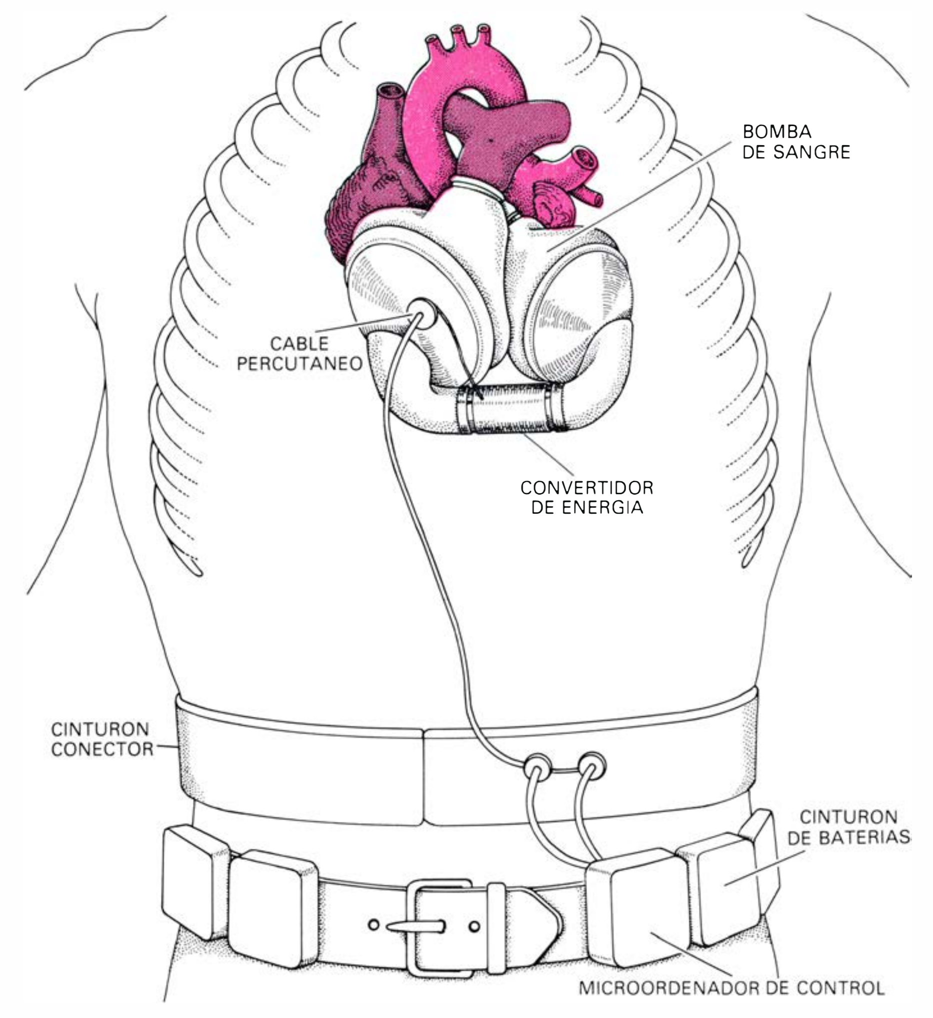
Las investigaciones sobre aparatos de asistencia del ventrículo izquierdo han sido llevadas a cabo por William Bernhard, del Instituto Pediátrico de la Policlínica de Boston, por Pierce, en la Facultad de Medicina de la Universidad del estado de Pennsylvania, por John Norman, del Instituto de Cardiología de Texas, y por Marco Turina y Åke Senning, del Hospital Clínico de Zurich. El Comité Asesor de Cardiología del National Heart, Lung, and Blood Institute ha recomendado que se dé prioridad al desarrollo de estos aparatos sobre la investigación del corazón completamente artificial. Aunque se trata de una decisión muy discutible, ha canalizado toda la ayuda financiera de los Institutes of Health hacia el desarrollo de los aparatos de asistencia al ventrículo izquierdo.

Una línea de investigación común al corazón artificial izquierdo y al corazón íntegramente artificial es el desarrollo de convertidores de energía eléctrica y de bombas de sangre. Mi equipo de la Universidad de Utah, en colaboración con Milton Isaacson, de Nu-Tech, Inc., está trabajando en un convertidor de energía hidráulica que sólo tiene una parte móvil. La parte propulsora de una bomba de flujo axial está sujeta al rotor de un motor de corriente continua desprovisto de escobillas; propulsor y rotor están sostenidos por un soporte hidrodinámico único. Al invertir la rotación de la bomba, se invierte el sentido del flujo hidráulico. El líquido hidráulico (aceite de silicona de baja viscosidad) activa el diafragma de la bomba de sangre, como si se tratara de aire comprimido. En el corazón artificial izquierdo, el flujo axial de la bomba desplaza el líquido hidráulico desde una bolsa que hace de reservorio hasta la bomba de sangre, y viceversa. En el corazón artificial, el líquido hidráulico se bombea de un lado a otro entre el ventrículo derecho y el izquierdo.

El convertidor de energía es tan pequeño, y tan elemental en su mecánica,



BOMBA MINIATURA para un corazón artificial electrohidráulico, que podría implantarse internamente y sustituir al motor neumático externo. Dotada de un solo componente móvil, va provista de dos estabilizadores y utiliza una hélice impulsora accionada por un motor de corriente continua sin escobillas. El aparato tiene el volumen de una pila de tamaño mediano y genera un flujo de 45 litros por minuto.



ESQUEMA DE UN PROYECTO DE CORAZON ARTIFICIAL activado por un motor eléctrico. La energía procedería de las baterías alojadas en el cinturón y se transmitiría a través de un cable fino junto con las señales de control del microordenador. El paciente podría así disfrutar de completa movilidad.

que puede implantarse sin comprimir las estructuras vitales. Pesa 85 gramos y ocupa un volumen de 30 centímetros cúbicos, es decir, el volumen aproximado de una pila de linterna de tamaño mediano. El convertidor está alimentado por una batería y un sistema electrónico externo, que se conectan al corazón mediante un cable muy fino que atraviesa el tórax. Las baterías pesan de 900 a 2200 gramos, y pueden llevarse en el chaleco o en un cinturón. Habrían de reemplazarse por baterías recargadas una o dos veces al día. La gran ventaja de este sistema es que el paciente podría moverse con entera libertad. Aunque este sistema posee muchas de las características que se esperan de un corazón artificial eléctrico portátil, de momento sólo se ha ensayado en un modelo circulatorio y en unos pocos terneros. Habrán de pasar varios años para que se demuestre con toda garantía la seguridad y la durabilidad del sistema y pueda ensayarse en pacientes humanos.

De cuanto antecede se desprende que quedan por resolver serios problemas técnicos antes de que pueda instalarse un corazón totalmente artificial en un tórax humano. A ello hay que sumar complicaciones de índole ética, social y económica. Cuando se haya perfeccionado el corazón artificial, deberá fabricarse en cantidad suficiente para que pueda beneficiar a un gran número de enfermos. Habrán de definirse los criterios de selección de pacientes con toda claridad y objetividad a fin de que se acorte al máximo el período de hospitalización y se consiga una recuperación rápida en un porcentaje elevado de los individuos. Estos pacientes necesitarán de asistencia social y psicológica para adaptarse a su situación, inédita en la historia humana. Pocas circunstancias habrá en las que la vida dependa tanto del funcionamiento de una aparato.

Para que el corazón artificial cumpla con su cometido deberá convertirse en algo más que una bomba, en algo más que un aparato funcional y seguro a toda costa: habrá de ser alto tan connatural que su portador se olvide de que lo lleva puesto.

Ciencia y sociedad

Cinco mil años de explotación minera

Investigaciones recientes llevadas a cabo por un equipo del Instituto de Estudios Arqueometalúrgicos con sede en Londres han arrojado nueva luz sobre la minería y fundición de los metales en la antigüedad. El equipo, a cuyo frente iba el profesor Beno Rothenberg, ha dado con el eslabón perdido de las minas de Río Tinto, según publica *Spectrum,* boletín de la sociedad Río Tinto-Zinc Corporation, en su número de enero.

El descubrimiento de útiles de piedra empleados en labores de minería en las montañas de escoria antigua en Minas de Río Tinto y otros hallazgos en una población vecina se han erigido como pruebas válidas de la existencia de una explotación minera ininterrumpida en esta zona de la España meridional, a lo largo de un intervalo que transcurre desde el tercer milenio antes de nuestra era hasta el presente. No hay otra mina en explotación que ofrezca una longevidad comparable.

En 1979, una campaña arqueológica afincada en la vertiente septentrional de Cerro Salomón –el monte que domina el complejo minero de Río Tinto– había llegado ya a la conclusión de que los orígenes de la fundición de la plata se remontaban allí hasta la fase tardía de la Edad del Bronce, mucho antes de que adquiriera su esplendor la industria argéntica fenicia, hacia el siglo VIII a. de C. El año pasado, la campaña se centró en la zona oriental, donde habrían de descubrirse vertederos de escoria de cobre. Desde hacía mucho tiempo se aceptaba en la comunidad científica que Río Tinto se convirtió en un abastecedor importante de cobre para el Imperio Romano. Pero no había pruebas de una minería tal in situ. Y su búsqueda constituyó el objetivo de la campaña auspiciada por el Instituto de Estudios Arqueometalúrgicos.

Las excavaciones de tanteo de algunas escombreras no lograron identificar ningún horizonte prerromano. Pero en un punto del área acotada se hallaron, en superficie, dos útiles de piedra. Los instrumentos habían sido tallados y afilados de suerte que encajaran en un mango de madera. Su forma era la acostumbrada en útiles mineros recuperados en otros yacimientos de Europa y de Oriente Medio.

El descubrimiento de los útiles, que pueden datarse como pertenecientes al tercer milenio antes de Cristo, despertó el interés por hallar indicios de minería en la que se usaran. Una inspección más exhaustiva de la escombrera en que se encontraron permitió recoger varias muestras de roca fuertemente mineralizada con malaquita, justamente el tipo de mena que los antiguos andaban buscando. A medida que el equipo exploraba los alrededores, iban surgiendo más muestras. Y en esa labor se encontraba Rothenberg cuando de pronto se halló ante una profunda cavidad a la que se llegaba a través de un pozo. Un geólogo español adscrito a la campaña le confirmó que se trataba de una mina antigua. Pero, ¿qué se extraía de ella? Probablemente, mineral de cobre.

A los pocos días, un arqueólogo aficionado de los alrededores le mostró al profesor Rothenberg dos útiles de piedra (hachuelas) y un cuenco que había recuperado cerca del pueblo de Nerva. Al acudir a visitar el lugar se topó con una tumba excavada sin pericia, que podía asociarse a la cultura argárica de la España meridional, en la primera mitad del segundo milenio antes de Cristo. Posteriores hallazgos superficiales de otros enterramientos en la zona reflejaban la existencia de un asentamiento humano en ese tiempo.

Ese era el "eslabón perdido" de la historia de Río Tinto, el enlace entre el origen de la minería local –que puede fecharse en los comienzos de la fase temprana de la Edad de Cobre (período calcolítico, del cuarto al tercer milenio antes de Cristo)– y la explotación industrial a gran escala del cobre y la plata en Río Tinto a lo largo del primer milenio antes de Cristo. El descubrimiento de las sepulturas de Nerva no constituye, por sí mismo, una prueba directa de explotación minera, pero sí muestra que allí hubo un poblado y, dado el escaso potencial agrícola de esa región montañosa, resulta difícil imaginar el sentido de otra ocupación que no fuese la minería.

Esbozando, pues, la historia de la minería de Río Tinto tendríamos que arrancar del tercer, o incluso del cuarto, milenio antes de Cristo, con un sistema de explotación rudimentario mediante útiles líticos y un método de fundición de excavación en el suelo. La ocupación del lugar se prolongó a lo largo del segundo milenio y, más tarde, en torno al año 1000 antes de Cristo, se entró en una fase de minería y fundición de la plata a gran escala. Eran los tiempos de los Tartessos, cuya industria y esplendor atrajo el comercio fenicio. La minería de la plata persistió con los iberos y la ocupación romana, si bien no parece que los romanos se sintieran muy preocupados por la producción real del mineral. Pero su postura cambió durante el reinado de Augusto y el afianzamiento del poder romano en la España meridional. Se hicieron entonces cargo de las operaciones, pero no introdujeron ninguna mejora en la explotación y fundición.

No ocurrió así con la minería del cobre, como se desprende de la observación de las escombreras. Con los romanos empezó la producción de este metal a escala industrial. También hay pruebas del interés romano en la extracción y tratamiento del hierro.

Concordie Apothecariorum Barcinone

El 8 de diciembre de 1980, la Facultad de Farmacia de la Universidad de Barcelona, en el acto académico celebrado con motivo de la festividad de su Patrona, anunciaba el hallazgo e incorporación a su fondo bibliográfico del único ejemplar conocido de la *Concordie Apothecariorum Barcinone,* de 1511, primera farmacopea española y segunda del mundo. Indudablemente se trataba de un hecho trascendental en la historia de la farmacia catalana, española e incluso universal.

El arte de curar es, sin duda, tan antiguo como el hombre. En los albores de la humanidad y durante milenios el conocedor de la enfermedad era al mismo tiempo quien, mediante ceremonias o pócimas, trataba de curarla. Durante siglos, el prescriptor de medicamentos, el preparador e incluso el que los administraba fueron una misma persona que, consecuentemente, sabía lo que quería administrar y lo preparaba de acuerdo con su propio saber.

Con el correr de los años, empezó la

especialización. El que visitaba al enfermo, diagnosticaba y prescribía ya no tenía tiempo de preparar o no tenía suficientes conocimientos para ello. Se diferenciaba poco a poco un nuevo profesional, el encargado de la preparación de los medicamentos en base a un profundo conocimiento de los mismos y de las técnicas de elaboración. Nacía el precursor del farmacéutico para colaborar en la tarea del precursor del médico.

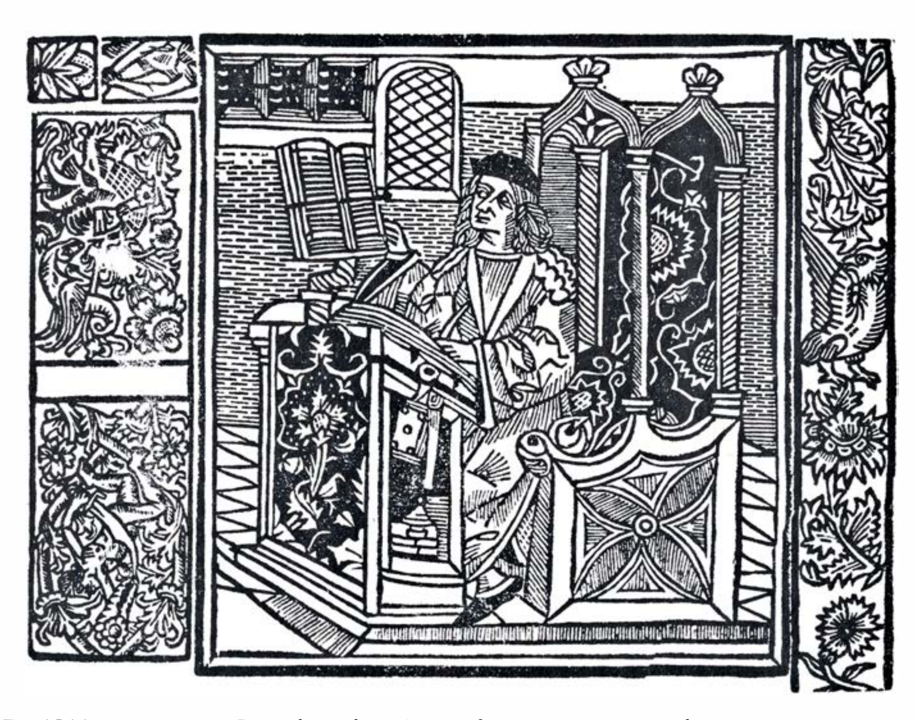
Con ello, el conocimiento de los "simples" (materias primas del medicamento procedentes de la naturaleza) y la elaboración de los "compuestos" (preparaciones medicamentosas, en general polifármacas) escapaba a la vigilancia directa del que prescribía y, dada la proliferación de "preparadores", daba lugar a preparaciones que, teniendo en común nombre y componentes, podían ser muy diferentes en composición y, por supuesto, acción. Se hacía indispensable una normalización de componentes y de técnicas de elaboración que tuviera la garantía de un personaje conocido, de una corporación o, incluso, de una entidad pública.

Así nacieron los *Grabadines* o *Krabadines* árabes, verdaderos códigos farmacéuticos a los que tenían que someterse los preparadores de medicamentos, obras que pueden considerarse precursoras de las farmacopeas. El primero conocido es de mediados del siglo IX, obra del director de la Escuela de Djondisabur, Sabor Ebn Sahl, al que siguieron los de Ebatollah-Ebn-Talmid y Mesué (edición princeps de 1471), entre otros. En España, el primer *Grabadin* lo escribió Ibn Abd Rabbin en el siglo X.

En el mundo medieval cristiano cumplieron idéntica función los *Antidotarios* y *Dispensatorios,* obras unipersonales en las que se recogían los conocimientos de la época sobre los simples, las fórmulas de los polifármacos y su preparación. Fueron particularmente conocidos el *Antidotarium* de Nicolás Salernitano (por su pertenencia a la escuela de Salerno, siglo XII), ampliado y comentado por Platearius (ed. pr. Venecia 1471), el *Antidotarium parvum* del Pseudo-Mesué del siglo XIII (ed. pr. Venecia 1498), el *Antidotarium magnum* de Nicolás Myrepsius, siglo XIII, conocido como *Antidotarium seu Medicamentorum Opus,* título de la edición princeps de 1491. Muy difundidos durante el siglo XV fueron obras similares contemporáneas como el *Dispensatorium ad aromatarios* de Nicolás Prepósito (Lyon 1488), el *Lumen apothecariorum* de Quirico de Therlona (1492) y el *Luminare majus* de Manlio de Bosco (1494).

La primera "farmacopea", o mejor dicho, la primera obra a la que se reconoce el carácter de código oficial de medicamentos, aún sin el apelativo de farmacopea, aparece en Florencia en 1498 con el título de *Nuovo Receptario composto dal Famossisimo Chollegio degli Eximii Doctori della Arte et Medicina della Inclita Cipta de Firenze,* para evitar el peligro para los enfermos que suponía la existencia de numerosos recetarios (del prefacio de la obra), lo que hizo que los cónsules de la "Universitá delli spetiali", antecesor de los gremios de especieros (boticarios), se dirigieran al Colegio de Médicos para que compusieran un recetario que sirviera tanto para el ejercicio de los preparadores como de los prescriptores.

Concordie apothecarioruꝫ Barchiñ. ĩ medicinis Cõpositis Liber feliciter incipit.



En 1511 apareció en Barcelona la primera farmacopea española, **Concordie Apothecariorum Barcinone:** *"acuerdo" entre los boticarios de Barcelona*

Trece años después, en 1511, aparece en Barcelona la *Concordie Apothecariorum Barcinone,* llamada *Concordia* por responder al "acuerdo" entre los boticarios de Barcelona expuesto en el preámbulo de la obra, cuando dice: "Aunque hasta el presente los boticarios de la Insigne ciudad de Barcelona hayan confeccionado las medicinas sin desviarse de las doctrinas de peritísimos doctores: vistas, no obstante, la diversidad de colores y sabores de las distintas operaciones para su composición, lo que ha motivado muchos coloquios entre boticarios, luego un Cabildo general de los Cónsules, habiendo sido por fin convocado un Consejo General, que acordó, *nemine discrepante,* que en lo sucesivo se compusieran las medicinas según los doctores más nombrados: Benmesue, Arnaldo de Vilanova, Nicolaus y otros de gran saber".

Podría argüirse que en la *Concordia* no consta explícitamente la aprobación de los médicos, pero puede darse por implícita cuando indica: "Y porque de poco o nada sirve que sean dadas normas si éstas no se cumplen, por eso, después de la invocación del auxilio divino, seguiremos nuestras indicadas conclusiones y operaremos de la manera que sigue".

En las ediciones siguientes de la *Concordia,* las de 1535 y de 1587, se salva dicha omisión. [Las ediciones de 1535 y 1587 llevan por título *Concordie Pharmacopolarum Barcinonensium.* Un estudio de las tres ediciones con el título de *Las Concordias de Barcelona del siglo XVI*, de J. M.ª Suñé Arbussá, se publicó en 1977 por la Real Academia de Farmacia de Barcelona.] La de 1535, porque consta a nombre del "eximio doctor en Medicina" Narciso Solano que actuaría como corrector de la obra, y la de 1587, porque menciona el consejo recibido del "celebérrimo y doctísimo Colegio de Médicos", que permite editarla "después de mucho tiempo y trabajo en hacer diligentemente enmiendas por parte de uno y otro Colegio" e incluye la aprobación médica representada por Francisco Domingo, Enrique Solá y Pedro Benedicto Soler.

La *Concordia* de Barcelona de 1511 es un volumen de 87 folios numerados en cifras romanas, más cuatro sin numerar dedicadas al índice o "Rubrica", escrito en latín, primorosamente impreso en papel recio afiligranado con dibujo en forma de mano abierta de la que sale una flor pedunculada de cinco pétalos, con una primera página dedicada al título *Concordie Apothecariorum Barchiñ. ĩ medicinis Cõpositis Liber feliciter incipit* acompañado de un grabado orlado representando un escribano, una segunda página con grabado dedicado a los Santos "Cosma et Damiane" y una tercera a "Sãcta Magdalena Ora p. nobis", patrona de los boticarios. La página siguiente contiene el preámbulo con los textos antes reproducidos y tiene especial interés por el escudo de Barcelona sostenido por dos ángeles.

A partir del folio tercero, empieza el verdadero formulario o parte monográfica de la *Concordia,* en hermosos caracteres góticos que se complementan con las R de "Recipe", especialmente ornamentales. La última página del formulario indica: "El presente compendio o recetario de los boticarios de Barcelona, fue impreso por Carlos Amorós, siendo cónsules y administradores de dicho Colegio: Gabriel Estanyol y Miguel Sancho. Veintidós del mes de octubre de MDXI. Loor a Dios glorioso y omnipotente".

Como se desprende de los párrafos transcritos anteriormente, la *Concordia* no pretende ser una obra original, sino una recopilación de las fórmulas más acreditadas y más usuales en las prescripciones de los médicos de la época, acompañadas de indicaciones sobre su preparación. Existen fórmulas de Mesué (Ebenmesue o Eben) en número de setenta y seis, de Nicolás (Nicolamus, Nicolai, Nicolas) en número de cincuenta, doce de Arnaldo de Vilanova y algunas de Avicena, Avenzoar, Galeno, Pedro de Argelata, Fulgencio, Rasis (Rassis, Rhacis), Guillermo de Plasencia, Bernardo de Granolachs, del *Luminare majus,* de uso común, etc., incluso una del Papa Juan II según él mismo la compuso. La selección se hizo tras largas deliberaciones culminadas en la aprobación por unanimidad (*nemine discrepante*) en el Consejo General. De su aceptación y utilización da fe el que veinticuatro años después tuviera que elaborarse una nueva edición. No en vano escribía Font y Sagué en 1908: "Siglo de renacimiento científico fue el siglo XVI, y durante él la Farmacia catalana camina delante de todas las naciones. Mientras los farmacéuticos extranjeros recibían todavía de los médicos formularios para la preparación de medicamentos, los catalanes habían salido ya de esta tutela, gracias a Pedro Benedicto Mateu y a su hijo. Nuestra ventaja no sólo se demuestra por este hecho, sino también por la publicación de la *Concordia Pharmacopolarum Barcinone,* impresa en 1511 y reimpresa en 1535". Font y Sagué escribía por refe-

rencias, ya que equivoca el título de la *Concordia*. Su alusión a Pere Benet Matheu, Pedro Benedicto Mateu, hace referencia al "Libro para el examen de boticarios y también para la enseñanza de muchos adolescentes", fechado el 12 de octubre de 1497, por lo que se considera primero de un farmacéutico español sobre su ciencia y segundo del mundo, que no fue publicado hasta el año 1521 por un hijo suyo. (José María Suñé.)

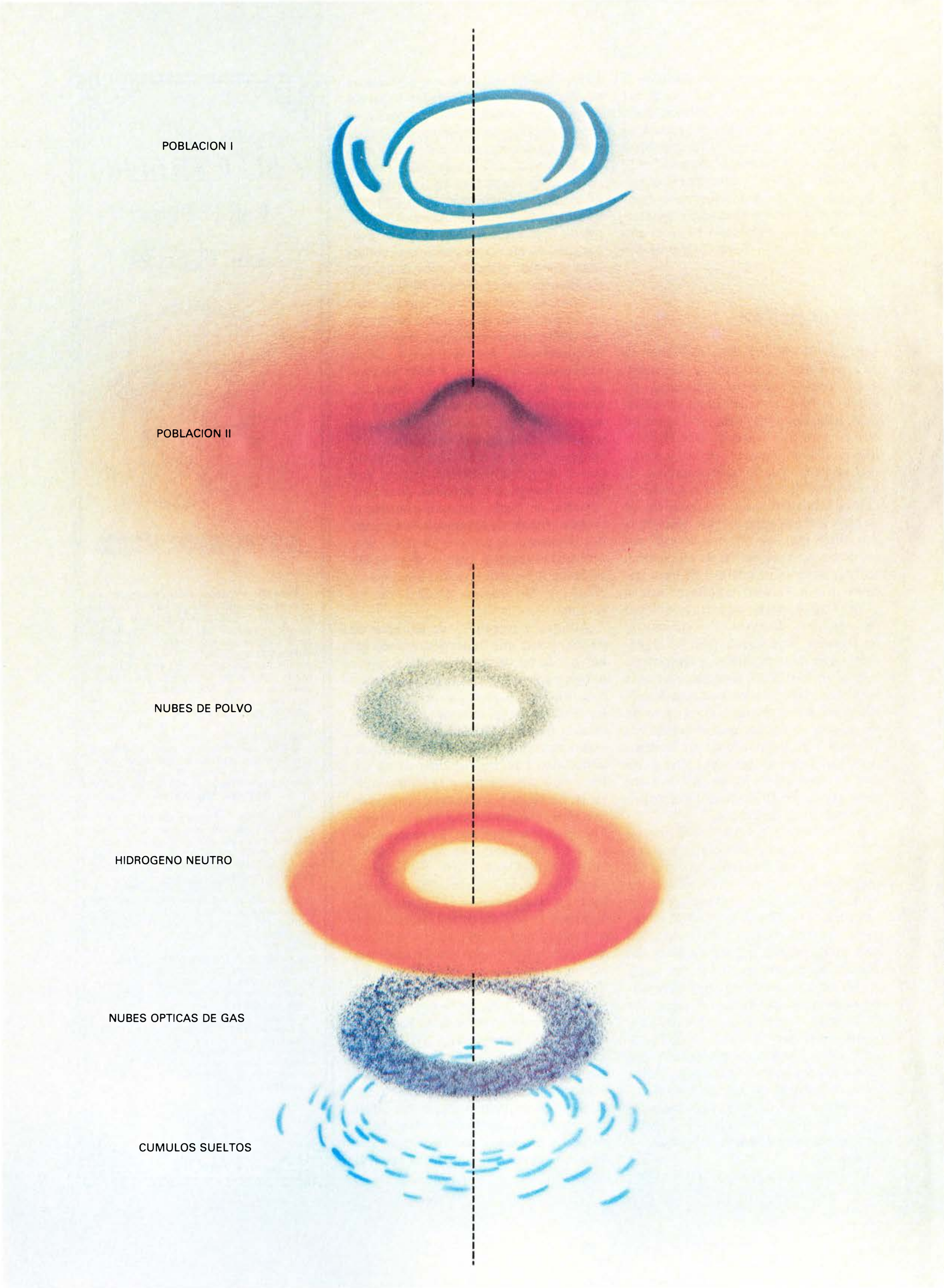
Nobel de medicina

En su última edición, el Nobel de medicina y fisiología se ha concedido, conjuntamente, a George D. Snell, de 76 años, quien hasta su jubilación, hace seis años, había trabajado en el laboratorio Jackson de Bar Harbor, Maine, a Jean Dausset, de la Universidad de París, y a Baruj Benacerraf, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Harvard. Los antecedentes de su obra se remontan a 1920, cuando se descubrió que los injertos de piel sobrevivían más tiempo si se efectuaban entre miembros de una misma línea endogámica de ratones o cobayos que si se realizaban entre miembros de líneas endogámicas distintas. El rechazo de los injertos se atribuyó a ciertas moléculas, los denominados antígenos de histocompatibilidad, exclusivos de cada individuo, salvo en los gemelos homozigóticos, que permitían al receptor de un injerto reconocer que el tejido era "extraño" y desencadenar su destrucción. Fue Peter Gorer, del Lister Institute of Preventive Medecine de Londres, quien, en 1937, describió por primera vez estos antígenos.

En 1942 Snell inició la obtención de cepas de ratones de elevada consanguinidad con la esperanza de localizar los antígenos de histocompatibilidad en puntos concretos del material genético del ratón. Descubrió que los dos antígenos que mostraban una asociación más pronunciada con el rechazo de injertos derivaban de dos genes situados en un corto segmento del cromosoma número 17 del ratón, el segmento denominado región *H*-2. Sabemos ahora que cada gen "fuerte" de *H*-2 presenta 100 o más formas variantes, y que cada una de éstas codifica una única proteína antigénica. Los antígenos actúan de marcadores en la superficie celular, dotando al individuo de capacidad para distinguir entre lo "propio" y lo "extraño".

En París, a principios de la década de 1950, Dausset sospechó que algunos de sus pacientes que presentaban bajos recuentos de glóbulos blancos padecían una reacción autoinmune provocada por antígenos extraños introducidos en su sistema, a raíz de repetidas transfusiones sanguíneas. Gracias al desarrollo de técnicas de aglutinación que permitían identificar y clasificar tipos celulares de leucocitos humanos, pudo probar que, en efecto, sus pacientes contenían glóbulos blancos de los donantes. Fundándose en el trabajo de Snell con ratones, Dausset propuso que los antígenos procedían de una sola región de los cromosomas humanos. De forma independiente, Jan van Rood, de la Universidad de Leiden, y Rose M. Payne, de la Universidad de Stanford, comprobaron, mediante la técnica de aglutinación de Dausset, que ciertas mujeres embarazadas producían anticuerpos frente a marcadores antigénicos de los glóbulos blancos fetales. Van Rood y Ruggiero Ceppellini, de la Universidad de Turín, demostraron que el rechazo rápido de los trasplantes humanos dependía de un solo locus del cromosoma número 6. Este locus se designó locus *A* de los leucocitos humanos, o *HLA,* y es análogo al *H*-2 de los ratones.

Aunque a principios de los años 60 ya se suponía que unos mecanismos genéticos de tal complejidad difícilmente habrían aparecido con la única y exclusiva función de rechazar los injertos o los órganos trasplantados, nadie había intuido aún la existencia de un lazo de unión entre los antígenos de histocompatibilidad y la organización de un sistema defensivo frente a la invasión de virus, bacterias y, en general, antígenos extraños; este sistema es lo que constituye el sistema inmune. El paso decisivo en este sentido lo dio, en 1967, Hugh O. McDevitt, de la Facultad de Medicina de la Universidad de Stanford, en el curso de la investigación de la respuesta inmune de los ratones frente a antígenos polipeptídicos artificiales, que habían sido sintetizados por Michael Sela, del Instituto Weizmann de Ciencia. McDevitt demostró que los genes responsables de la respuesta inmune, o genes *Ir,* se localizaban en la mitad del complejo *H*-2. Benacerraf, que había observado respuestas inmunes similares en el cobayo, confirmó los hallazgos de McDevitt y, junto a sus colaboradores, aportó abundante información sobre la naturaleza y función de los genes *Ir* y sobre las complejas interacciones celulares requeridas para su expresión.


POBLACION I
POBLACION II
NUBES DE POLVO
HIDROGENO NEUTRO
NUBES OPTICAS DE GAS
CUMULOS SUELTOS

La galaxia de Andrómeda

Esta gran galaxia espiral se ha convertido en laboratorio para el estudio de la evolución de estrellas y galaxias. Pero no nos ha revelado aún todos los misterios que encierra; por ejemplo, ¿cómo se organizan los brazos espirales galácticos?

Paul W. Hodge

Corría el año 1611. Los vigilantes nocturnos hacían sus rondas en las ciudades de Europa. Las llamas de sus velas estaban protegidas de la lluvia y el viento mediante linternas cuyas ventanillas tenían una fina cubierta de cuerno. El astrónomo bávaro Simon Marius dirigió su telescopio hacia una mancha nebulosa de luz en la región del cielo ocupada por la constelación de Andrómeda. Había comparado tal nebulosidad a "una vela vista por la noche a través del cuerno".

Su descripción da una buena idea del aspecto que el objeto ahora llamado galaxia de Andrómeda presenta para quien tenga un telescopio pequeño, pero no permite sospechar el lugar que la galaxia de Andrómeda ha ocupado en la historia de la astronomía. Vista con los grandes telescopios modernos, resulta ser una galaxia espiral gigantesca. Aunque se cree que su forma es semejante a la de nuestra propia galaxia, la Vía Láctea, la galaxia de Andrómeda parece doblar a ésta en tamaño: puede incluir hasta 400.000 millones de estrellas. A una distancia de dos millones de años-luz del sistema solar, se trata de la galaxia más cercana a la nuestra y la única de entre las espirales que está lo bastante próxima para verla en detalle. La propia Vía Láctea es menos propicia a una inspección de conjunto porque, desde la atalaya terrestre, hay nubes de polvo que ocultan su estructura. La galaxia de Andrómeda ha sido, por tanto, responsable de grandes avances en la comprensión de asuntos tales como la evolución de las estrellas, la rotación de las galaxias y la escala de distancias en el Universo. En la actualidad se están examinando las fuentes de rayos X y de emisiones en la banda de radio del espectro electromagnético procedentes de tal galaxia. Con la construcción de nuevos telescopios en la Tierra y en órbita, la galaxia de Andrómeda se convierte en el blanco principal a explorar a través de métodos poderosos y modernos.

Investigación de la distancia

El primer estudio moderno de la galaxia de Andrómeda se realizó hace casi 100 años, cuando la fotografía ofreció por primera vez una manera de registrar luz demasiado débil para poder apreciarla visualmente y, con ello, una vía de penetración profunda en el espacio. Isaac Roberts, con un telescopio de 50 centímetros, tomó las primeras fotografías de la galaxia de Andrómeda que mostraron su estructura espiral. Las fotografías sugerían también la presencia de débiles estrellas en las partes periféricas de la espiral, pero esa indicación de la naturaleza del objeto pasó desapercibida en aquella época. Por el contrario, se supuso que la Gran Nebulosa de Andrómeda era una nube de gas que podría, con el tiempo, condensarse para formar una estrella con un sistema planetario. Parecía ser la mayor, la más brillante y, por tanto, probablemente la más cercana de entre cientos de nebulosas similares. Se creyó, pues, que estaba relativamente cercana al sistema solar.

La idea de que hubiera sistemas de estrellas más allá de la Vía Láctea se les ocurrió pronto a varios investigadores, entre ellos a Edwin P. Hubble, del Observatorio del Monte Wilson. En 1925, Hubble demostró que la pequeña y poco notoria nebulosa NGC 6822 era un distante conjunto de estrellas. Mientras tanto, la gran espiral de Andrómeda ocupaba una parte notable de su atención. Fue el tema de su histórico artículo "Una nebulosa espiral como sistema estelar" ("A Spiral Nebula as a Stellar System"), publicado en 1929. Las muchas fotografías que Hubble tomó del objeto mostraban un núcleo, grueso y amorfo, de luz rodeado por brazos espirales estrechamente enrollados y constituidos por nubes de polvo, cúmulos de estrellas y miles de puntos luminosos, cada uno de los cuales era una estrella.

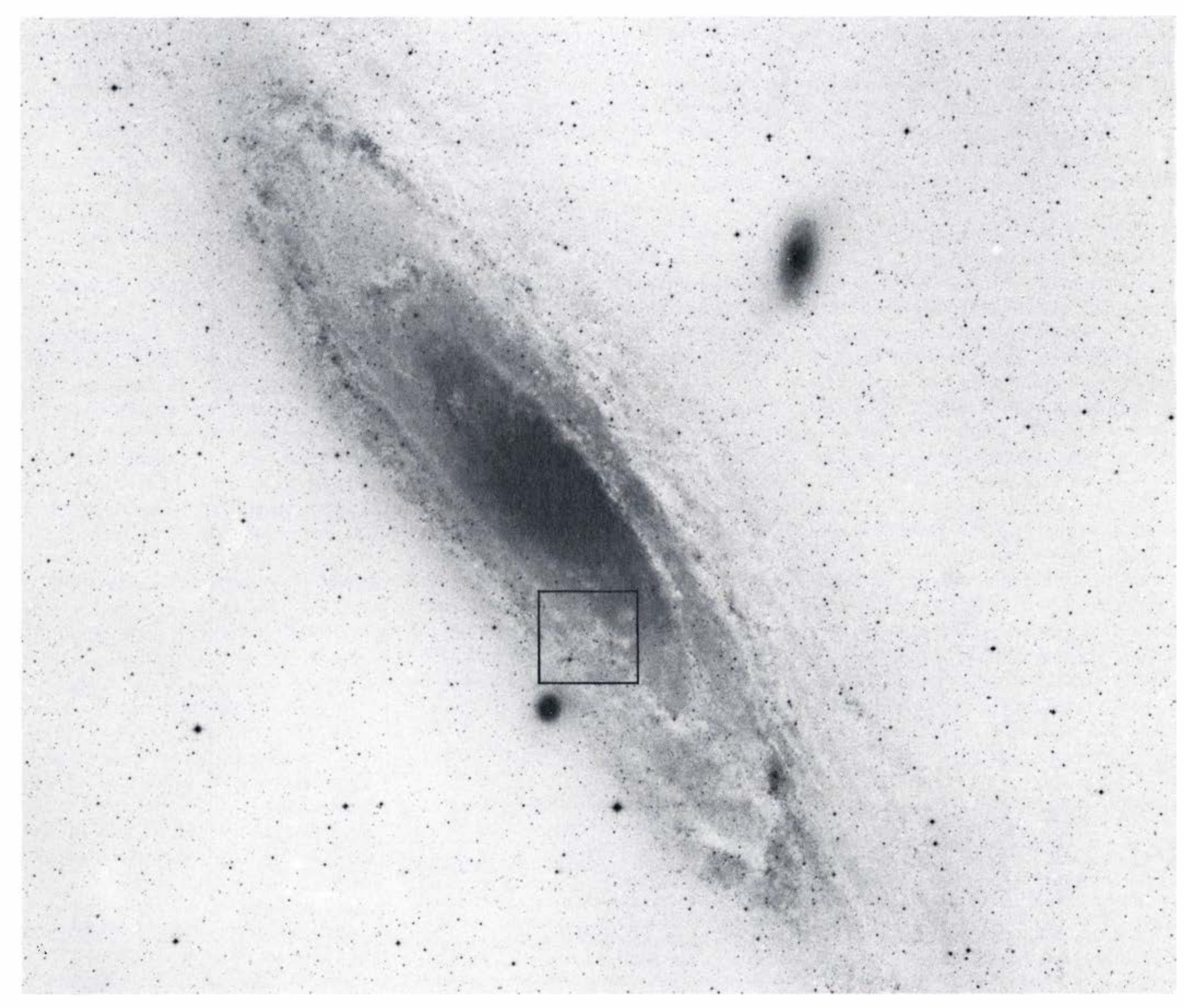
La demostración que Hubble ofreció de la gran distancia a que se encontraba Andrómeda se deducía de su descubrimiento de la existencia de 40 estrellas pulsantes en la espiral. El examen de fotografías sucesivas de la galaxia mostró que las estrellas se intensificaban y se debilitaban periódicamente. Hubble reconoció tales estrellas como cefeidas variables, que se encuentran también en la Vía Láctea. Harlow Shapley había ya demostrado que las cefeidas variables podían servir como medida de longitud astronómica: la luminosidad

ESQUEMA POR SEPARADO que muestra la distribución de los principales tipos de objetos que hallamos en la galaxia de Andrómeda. Para cada nivel de ilustración, la línea vertical de trazos indica el centro de la galaxia y la dirección horizontal corresponde al eje mayor del disco aparente de la imagen de la galaxia en el cielo. Las estrellas de la Población I (*nivel superior*) son jóvenes y azules. Distribuidas en segmentos, sugieren una configuración espiral considerablemente imperfecta. La forma en la ilustración refleja la interpretación del autor respecto a la distribución de las estrellas. Las estrellas de la Población II (*segundo nivel*) son antiguas y rojas. Constituyen el núcleo central de la galaxia y, en menor grado, el disco galáctico. Se extienden en la ilustración hasta un radio de unos 130.000 años-luz, lo que las sitúa más allá de la imagen óptica de la galaxia en la fotografía de la página siguiente. Las estrellas de la Población II también constituyen las agregaciones conocidas como cúmulos globulares (no representados), que están distribuidos por encima y por debajo del plano de la galaxia. Podemos distinguir las nubes de polvo (*tercer nivel*) porque proporcionan un tono rojizo a la luz procedente de las estrellas situadas detrás de ellas y llegan incluso a interceptarla. Su distribución es máxima hacia el Nordeste (izquierda en la ilustración). El hidrógeno neutro (no ionizado) (*cuarto nivel*) se detecta por su emisión en la región de radio del espectro electromagnético. Su distribución adquiere la forma de una rosquilla. La indicación de la formación de estrellas la suministran las nubes de gas ópticas (*quinto nivel*), que se hacen luminosas por su proximidad a estrellas jóvenes y calientes. Su distribución viene a coincidir casi con la región de los segmentos de brazos espirales. Los cúmulos abiertos (*nivel inferior, en color azul*) son agregados sueltos de estrellas de la Población I. Su distribución, sin embargo, no sugiere una configuración espiral clara.

intrínseca de una cefeida variable es proporcional al intervalo de tiempo entre su intensificación y su debilitamiento, mientras que su luminosidad aparente puede, por supuesto, medirse directamente. La relación entre las dos luminosidades es proporcional al cuadrado de la distancia de la estrella. Usando la calibración hecha por Shapley de la relación entre el período de tiempo y la luminosidad intrínseca, Hubble concluyó que la espiral de Andrómeda debe estar a una distancia de casi un millón de años-luz de la Tierra, mucho más allá del límite de la Vía Láctea. Los trabajos subsiguientes han demostrado que la galaxia de Andrómeda está en realidad a más del doble de la distancia calculada por Hubble. Volveré sobre este punto más tarde.

Comparando una sucesión de fotografías, Hubble descubrió también 63 estrellas que fulguraban en luminosidad y después se apagaban lentamente. Estas son novas. Se cree ahora que las fulguraciones de luz son emitidas cuando el gas escapa de una estrella gigante, cae sobre la superficie de una estrella compañera caliente y densa y explota en un repentino episodio de fusión nuclear. De hecho, la superficie de la estrella compañera se convierte en una bomba de hidrógeno. Las novas existentes en la Vía Láctea muestran que, cuando su brillo es máximo, estos objetos despiden una luminosidad aproximadamente igual a la de las estrellas normales más brillantes. En la galaxia de Andrómeda, Hubble halló que las novas eran muy débiles, aunque su luminosidad era igual a la de las más brillantes estrellas en tal galaxia. Ello constituía una prueba ulterior de la gran distancia a que la galaxia se encontraba.

En 1885 se había observado cerca del centro de la nebulosa de Andrómeda otro suceso identificado como una nova. En el momento de su máximo brillo, resultaba extraordinariamente luminoso. De hecho, se podía contemplar, casi a simple vista. En debates posteriores, el suceso, designado como S Andrómeda, se citaba a modo de



LA GALAXIA DE ANDROMEDA se extiende de Nordeste a Suroeste en el cielo del Hemisferio Norte. Por ser su plano oblicuo con respecto a la Tierra, la parte más próxima de la galaxia constituye el borde septentrional de su disco. La fotografía que aparece aquí es un negativo. Así, las partes oscuras de la galaxia están formadas por estrellas y las partes blancas, por polvo, que oculta las estrellas detrás de él. A la derecha del núcleo central de la galaxia hay una banda muy marcada de polvo. La mancha negra subyacente del núcleo es M32, una galaxia compañera. Sobre el núcleo, y a su derecha, se aprecia una segunda galaxia compañera, NGC 205. Hay otras dos galaxias compañeras que caen fuera del campo visual. El diámetro de esta imagen de la galaxia de Andrómeda es de unos 125.000 años-luz, y la galaxia se encuentra a dos millones de años-luz de la Tierra. Por tanto, la galaxia, cuya forma se cree semejante a la de la Vía Láctea, subtiende un ángulo de tres grados en el cielo, es decir, seis veces el ángulo subtendido por la Luna. El rectángulo marca la parte representada en la fotografía de la página opuesta. La fotografía se tomó con el telescopio Schmidt de 1,2 metros de Monte Palomar.

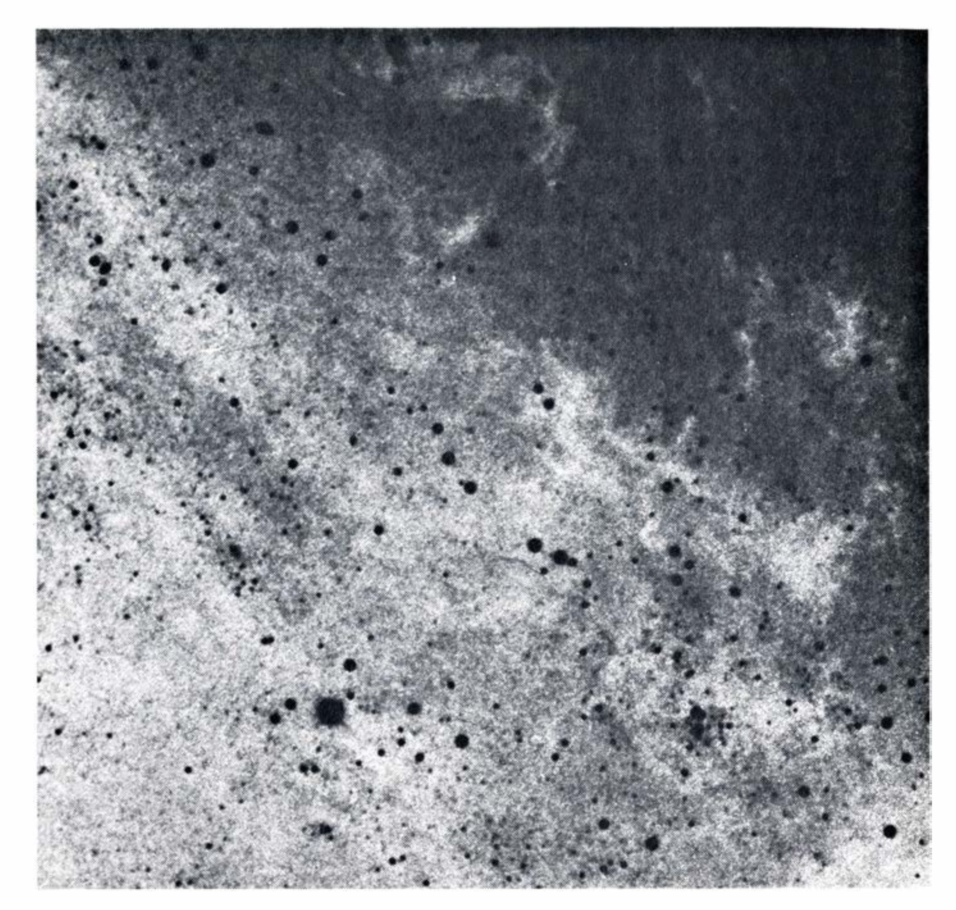
prueba de que la nebulosa debía estar dentro de nuestra galaxia. De otra suerte, se argumentaba, S Andrómeda habría sido excesivamente brillante para tratarse de una nova. El estudio realizado por Hubble de las muchas novas existentes en la galaxia de Andrómeda le convenció de que S Andrómeda pertenecía a una clase excepcional de explosiones estelares que, justamente por aquel tiempo, se estaban empezando a conocer. Se llaman ahora supernovas. Al contrario de las novas ordinarias, las supernovas son explosiones que destruyen una estrella. Hasta ahora, S Andrómeda es la única supernova observada en la galaxia de Andrómeda. Las estadísticas referentes a otras galaxias sugieren que no debería sorprendernos ver otra cualquier día.

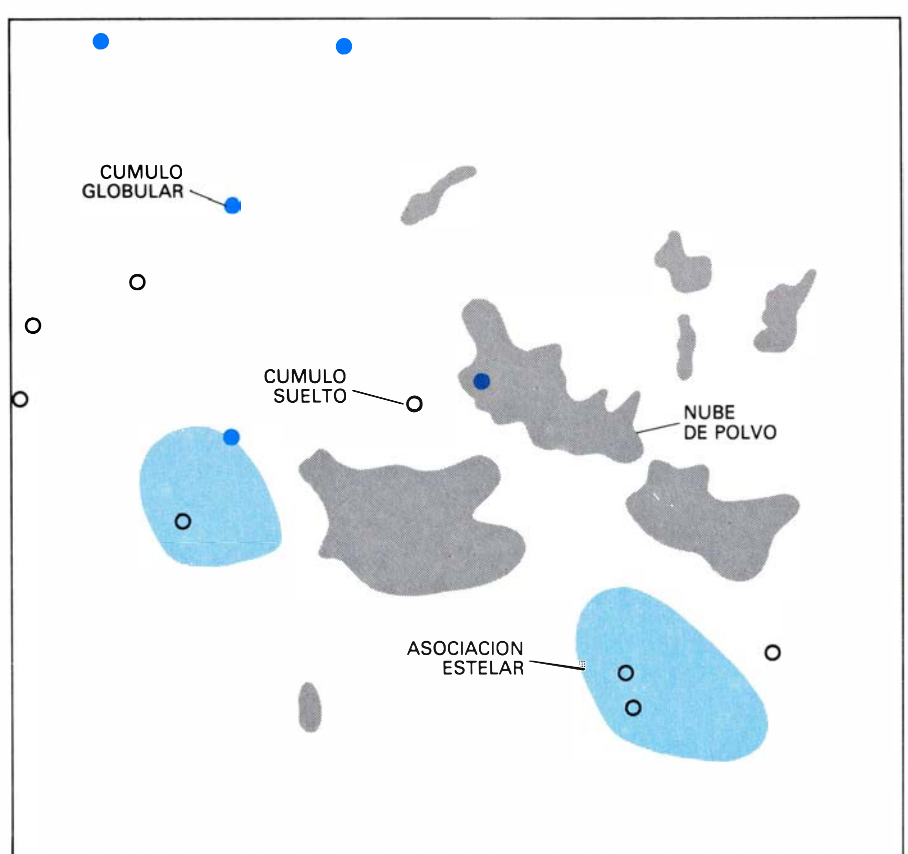
Los descubrimientos de Baade

La siguiente figura importante en la exploración de la galaxia de Andrómeda fue Walter Baade, quien exploró sistemáticamente la galaxia con el telescopio de 2,5 metros de Monte Wilson. Su trabajo condujo a dos descubrimientos que provocaron una completa revisión de nuestro conocimiento de las estrellas y de nuestra escala de distancias del universo.

El primer descubrimiento llegó en 1944, en plena guerra. Baade era por entonces súbdito alemán, circunstancia que le excluyó del reclutamiento militar norteamericano. Vino a convertirse así en poco menos que el único usuario del telescopio de 2,5 metros y dispuso de tiempo sobrado para experimentar con nuevas emulsiones fotográficas y con filtros ópticos de diversos colores. Durante la guerra, la cercana ciudad de Los Angeles se oscurecía ocasionalmente por razones estratégicas. En esas noches el cielo estaba desusadamente oscuro y Baade pudo ir extendiendo su exploración fotográfica de la galaxia de Andrómeda para registrar características cada vez más débiles.

Baade estaba tratando de explicar por qué los brazos espirales de la galaxia de Andrómeda se podían resolver bien en estrellas individuales en las fotografías de la galaxia, mientras que la brillante y amorfa región central desafiaba la resolución, incluso en las mejores placas fotográficas de Hubble. La luz procedente de la región central provenía indudablemente de millones de estrellas. ¿Por qué no podía verse ninguna de ellas? Para complicar el misterio, cuatro pequeñas galaxias, algo desdibujadas, acompañaban a la gigantesca galaxia espiral (dos están más próxi-



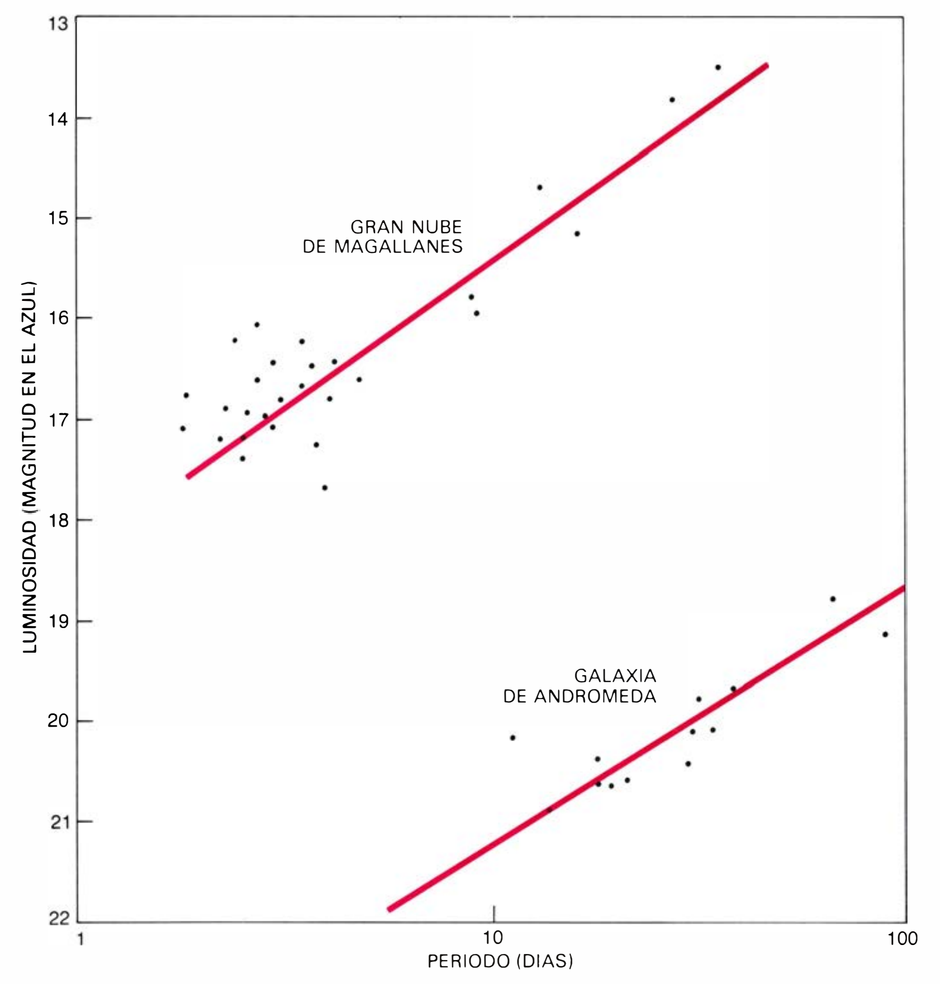


ABUNDANCIA DE OBJETOS existente en la galaxia de Andrómeda. Nos la sugiere la fotografía de la parte superior, donde sólo está representada una pequeña porción de la galaxia. El mapa de la parte inferior identifica algunos objetos. Tanto los "cúmulos sueltos" como los "cúmulos globulares" son agregaciones de estrellas. En la galaxia de la Vía Láctea, los primeros son más jóvenes y menos compactos que los segundos, pero esta distinción es menos clara para los cúmulos de la galaxia de Andrómeda. Cada cúmulo aparece como una simple mancha luminosa. Las "asociaciones estelares" son agregaciones sueltas de estrellas muy jóvenes. La fotografía se realizó con el telescopio de cuatro metros de Kitt Peak.

mas y las otras dos más distantes) y tampoco éstas se podían resolver en estrellas.

Con el tiempo, Baade ensayó una afortunada combinación: emulsiones fotográficas sensibles a la luz roja, un filtro rojo, condiciones atmosféricas perfectas, oscurecimiento de la ciudad de Los Angeles y tiempos de exposición extremadamente largos. Las fotografías resultantes no sólo resolvieron en estrellas el núcleo central de la galaxia de Andrómeda y de las cuatro galaxias compañeras, sino que además condujeron a Baade a distinguir entre dos poblaciones estelares. Las esquivas estrellas que aparecían en las placas de Baade eran gigantes rojas, demasiado débiles a pesar de su tamaño para ser individualizadas en las emulsiones previamente empleadas. Pertenecían a una clase que Baade llamó Población II. Sostenía que tales estrellas eran las mismas que las que constituyen los agregados de la Vía Láctea denominados cúmulos globulares.

Las estrellas de la Población II predominan en número en el centro de la galaxia de Andrómeda y en los cúmulos globulares de esta galaxia, cúmulos que están repartidos por el interior de un volumen esférico que se extiende por encima y por debajo del plano del disco galáctico. En masa (aunque no en luminosidad) probablemente predominan a lo largo de toda la galaxia de Andrómeda. El trabajo posterior de Baade, sus discípulos y otros mostró que las estrellas de la Población II tenían una antigüedad de unos 12.000 millones de años, lo que las hacía casi tan antiguas como el universo. En contraste, la Población I está compuesta de las brillantes estrellas azules que forman los brazos espirales; se cree que éstas son jóvenes. La Población I incluye también el gas y el polvo que tienden a envolver a las brillantes estrellas azules.



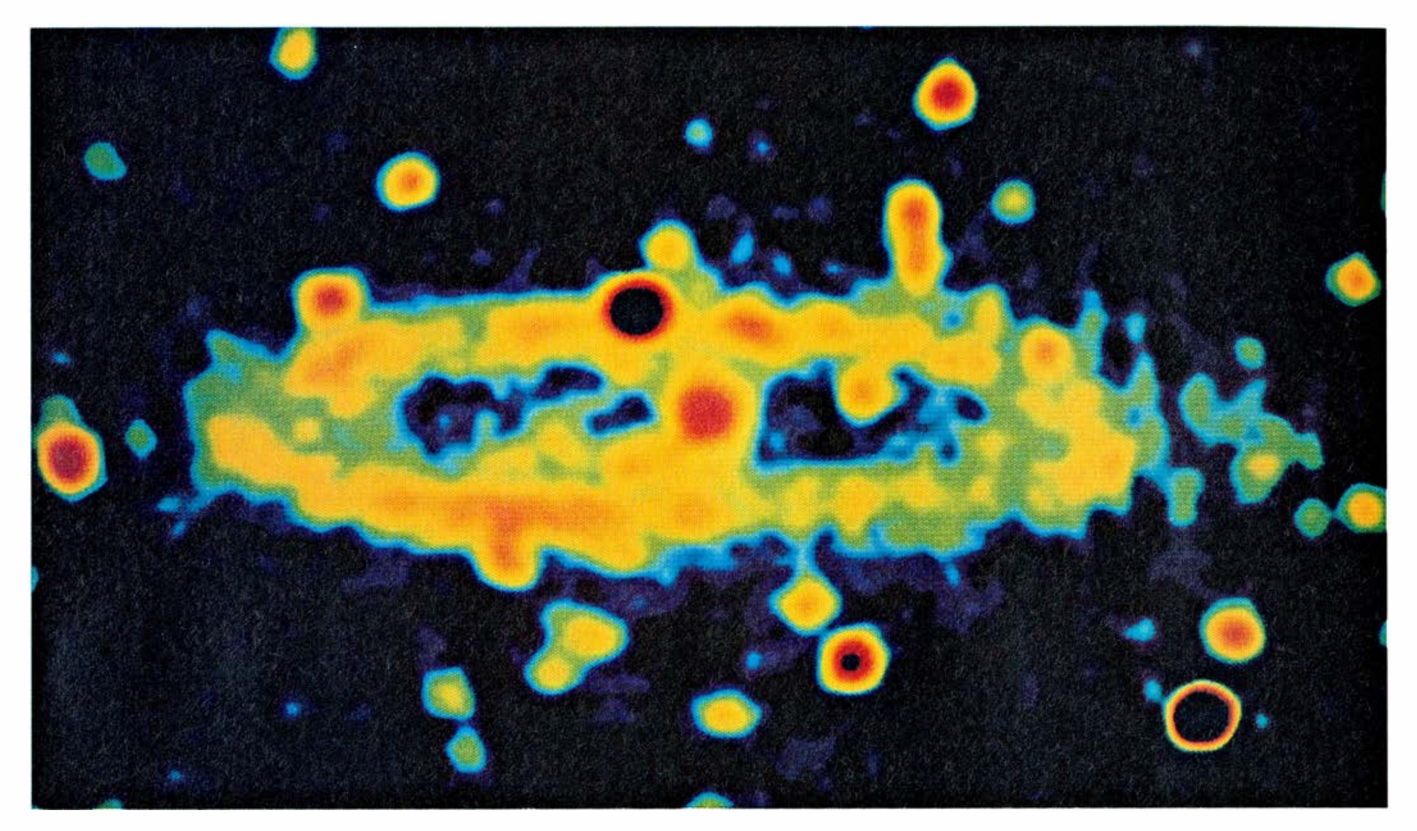
DIFERENCIA DE LUMINOSIDAD entre las estrellas cefeidas variables de la galaxia de Andrómeda y las de la Gran Nube de Magallanes (pequeña galaxia compañera de la nuestra: la Vía Láctea); esa diferencia nos permite deducir la distancia a que se halla la galaxia de Andrómeda. La luminosidad de cada una de tales estrellas en la Gran Nube de Magallanes varía con una periodicidad (*eje horizontal*) que es proporcional a su brillo (*eje vertical*). Las cefeidas de la galaxia de Andrómeda muestran el mismo comportamiento, pero las estrellas parecen ser más débiles como consecuencia de la mayor distancia. En particular, una diferencia de cinco magnitudes indica una diferencia de 100 veces en brillo y una diferencia de diez veces en distancia. La Gran Nube de Magallanes se encuentra a 200.000 años-luz de la Tierra.

El segundo descubrimiento importante de Baade guardaba también estrecha relación con la galaxia de Andrómeda. Los cúmulos globulares de la Vía Láctea incluyen unas pocas cefeidas variables y Shapley las había usado para calibrar la relación entre el período y la luminosidad para las cefeidas en general. Sin embargo, Baade observó que, en los cúmulos globulares de la Vía Láctea, las más brillantes de las estrellas gigantes rojas tenían aproximadamente la misma luminosidad aparente que las cefeidas variables, cuyos períodos estaban comprendidos entre 30 y 40 días. En la galaxia de Andrómeda, la más brillante de entre las gigantes rojas eran más débiles que las cefeidas que tenían esos períodos y no pertenecían a cúmulos globulares.

La solución de esta discrepancia se dio conocer en la reunión de 1952 de la Unión Internacional Astronómica en Roma, cuando Baade mostró que las cefeidas variables de los cúmulos globulares de la Vía Láctea constituían una clase especial de estrellas que se encontraba solamente en compañía de las estrellas de la Población II. No eran iguales que las cefeidas variables de los brazos espirales de la galaxia de Andrómeda o de los de la Vía Láctea. Las cefeidas de los cúmulos globulares son intrínsecamente unas cuatro veces más débiles que las cefeidas de los brazos espirales con el mismo período de variación. Como el brillo aparente de un objeto varía en razón inversa del cuadrado de la distancia, se deduce que las cefeidas estudiadas por Hubble en la galaxia de Andrómeda deben hallarse dos veces más lejanas de lo que Hubble había calculado. Las distancias supuestas de todas las galaxias dependían de la serie de razonamientos de Hubble, de modo que el segundo descubrimiento de Baade duplicó el tamaño del universo.

Formación de estrellas

El interés de Baade por las poblaciones estelares le llevó a observar que el gas y el polvo en la galaxia de Andrómeda parecían estar asociados exclusivamente con las estrellas de la Población I. Esta asociación constituía una prueba circunstancial de que el gas y el polvo indican regiones donde se están formando nuevas estrellas. En resumen, las brillantes estrellas azules de la Población I son jóvenes porque una estrella tan luminosa como ellas es incapaz de mantener esa producción de energía durante mucho tiempo. Por tanto, resulta evidente que el gas y el



RADIOEMISION DE LA GALAXIA DE ANDROMEDA a la longitud de onda de 11 centímetros, cartografiada mediante ordenador en el Rheinisches Landesmuseum de Bonn, República Federal Alemana. El rojo significa la máxima intensidad y el violeta, la mínima. Así, la fuente de emisión más intensa se localiza en el centro de la galaxia, región que resalta probablemente por la concentración de restos de explosiones de estrellas. La simetría de conjunto de la configuración es producida por fuentes a un radio de unos 30.000 años-luz del centro galáctico. Esta distancia también caracteriza la distribución de nubes de gas caliente, que delimitan regiones de formación de estrellas. Los datos se obtuvieron con el radiotelescopio de 100 metros de Effelsberg en Alemania Occidental por Rainer Beck, Elly Berkhuijsen y Richard Wielebinski, adscritos al Instituto Max Planck de Radioastronomía.

polvo proporcionan la materia prima de la que se forman las estrellas. Las partículas de polvo pueden constituir núcleos de condensación para el gas.

Tratando de descubrir ambas cosas, cómo se forman las estrellas y cómo se disponen las regiones de formación de estrellas en una galaxia espiral, Baade examinó la distribución de nubes calientes de gas. Tales nubes están iluminadas por las jóvenes y brillantes estrellas inmersas en ellas, pero absorben la luz y después la emiten solamente en ciertas longitudes de onda, cuyas energías corresponden a excitaciones de los electrones en los átomos del gas. Tomando fotografías con filtros que solamente permitían el paso de esas longitudes de onda, Baade pudo cartografiar las posiciones de 688 nubes de gas en la galaxia de Andrómeda. Halló que estaban concentradas en los brazos espirales. Resultaban más conspicuas hacia la mitad de la longitud de los brazos espirales, entre 30.000 y 40.000 años-luz del centro de la galaxia. Esas son las regiones donde las estrellas azules brillantes muestran su mayor concentración y, por tanto, también es en esas regiones donde se están ahora formando las estrellas más nuevas de la galaxia.

Con el desarrollo de la radioastronomía se dispuso de nuevos métodos para examinar la formación de estrellas. El avance más importante de todos fue el descubrimiento de la radioemisión del hidrógeno molecular neutro (o no ionizado) a la longitud de onda de 21 centímetros. Cada fotón, o cuanto de emisión, se produce cuando el momento cinético intrínseco del electrón en un átomo de hidrógeno se invierte con respecto al del protón del átomo. Es también necesario que el átomo se encuentre en su estado más bajo de energía, de modo que el átomo de hidrógeno que emite la radiación no pueda fácilmente entrar en colisión. (Los choques o colisiones excitarían los átomos de hidrógeno a niveles de energía más elevados.) Así pues, las fuentes astronómicas de la radiación de 21 centímetros son nubes de gas frías y delgadas.

El estudio del hidrógeno neutro, que marcó un hito histórico, llegó en 1966 cuando Morton S. Roberts, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, empleó el radiotelescopio de 91 metros de Green Bank, en Virginia Occidental, para acumular datos con que construir un mapa de alta resolución de la radiación de 21 centímetros originada en la galaxia de Andrómeda. En lugar de un disco de gas coincidente con la distribución galáctica de las estrellas, Roberts halló que la distribución del hidrógeno neutro se parecía a una gigantesca rosquilla, con un agujero en el centro y una densidad máxima hacia 40.000 años-luz del centro, distancia que correspondía tanto a la más brillante porción de los brazos espirales cuanto a la máxima concentración de nubes de gas cartografiada por Baade. Hasta este punto, las distribuciones de hidrógeno frío y caliente coinciden.

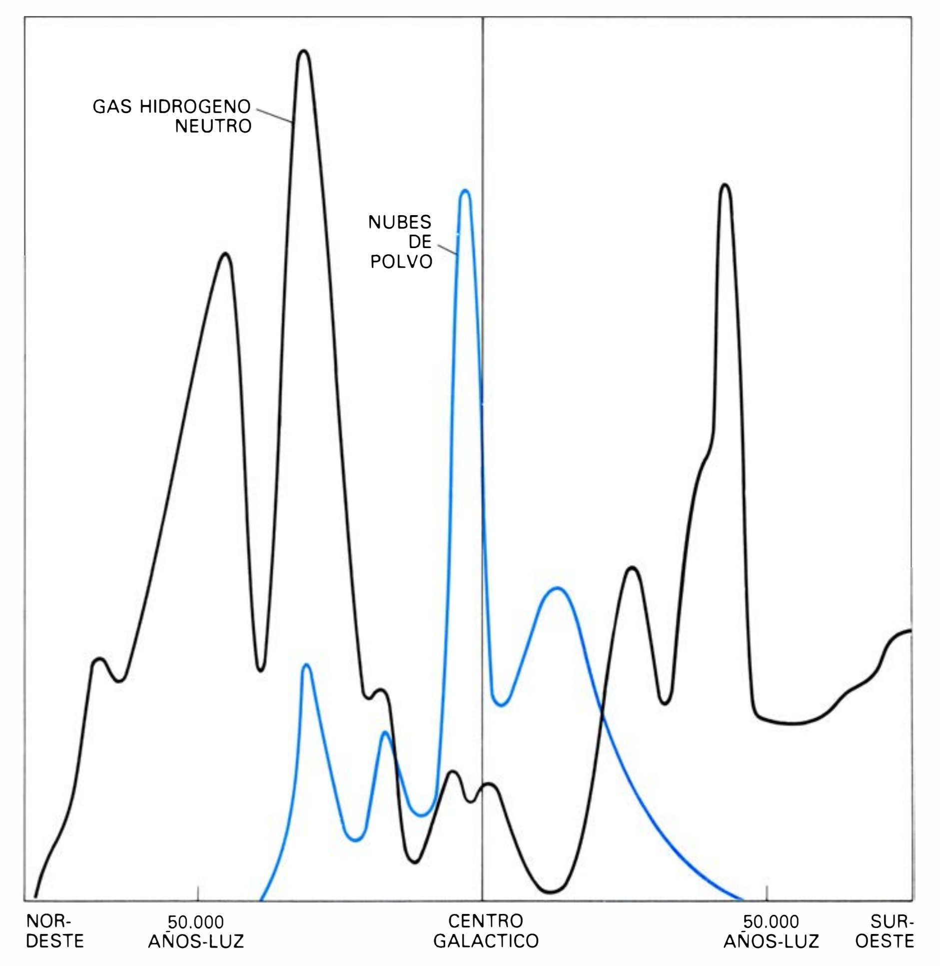
Más allá de la parte más gruesa de la rosquilla, las dos distribuciones difieren. Las nubes de gas caliente se adelgazan hasta desaparecer a unos 50.000 años-luz. El hidrógeno neutro frío puede detectarse hasta dos veces esa distancia. Se sabe ya que esta clase de distribución es bastante corriente en las galaxias espirales gigantes y que, asimismo, resulta de una combinación de causas. En la región interior de una tal galaxia predominan las estrellas de la Población II. La formación de estrellas terminó hace mucho tiempo, y ha quedado poco gas. En la región intermedia, donde abunda todavía el gas, las ondas de choque de la densidad del gas

desencadenan evidentemente, a su paso, la condensación de nuevas estrellas. En la región externa, tales ondas de choque son débiles o están ausentes y consiguientemente la densidad se mantiene demasiado baja para que se condensen nuevas estrellas.

En años recientes se ha averiguado todavía más acerca de la distribución del hidrógeno neutro como resultado del desarrollo de radiotelescopios en los que se elaboran señales procedentes de varias antenas parabólicas para dar una resolución igual a la de un telescopio del tamaño de la distancia que separa dichas antenas. Entre los primeros estudios acometidos con esta nueva generación de instrumentos se cuenta el trabajo de D. T. Emerson y sus colegas, de la Universidad de Cambridge, quienes emplearon el Telescopio Cambridge de Media Milla para poner de manifiesto que el agujero de la rosquilla de hidrógeno neutro en la galaxia de Andrómeda se extendía a una distancia de unos 12.000 años-luz del centro galáctico. Desde esa distancia hacia la periferia, las distribuciones de hidrógeno y polvo parecen coincidir estrechamente entre sí. Por otro lado, los investigadores de Cambridge hallaron hidrógeno a unos 105.000 años-luz del centro de la galaxia de Andrómeda a lo largo del eje mayor suroccidental de la galaxia. (La galaxia está inclinada de Nordeste a Suroeste en el cielo.) Esto sitúa al hidrógeno más lejos del centro de la galaxia que cualquier parte de ella observada en la imagen de un telescopio óptico.

Los últimos mapas de hidrógeno

Muy recientemente, Estaban Bajaja, del Observatorio Westerbork, ha realizado un estudio todavía más detallado del hidrógeno neutro en la galaxia de Andrómeda empleando el Telescopio Síntesis de Apertura, en Westerbork, Holanda. Aunque no se han publicado todavía todos los resultados. Bajaja ha hallado una estrecha correspondencia entre el hidrógeno y el polvo ópticamente visible sólo a lo largo del eje mayor Nordeste, y, por tanto, en sólo la mitad de la galaxia. Al otro lado del centro galáctico, la distribución del gas y la del polvo están mal definidas.



SE COMPARAN LAS DISTRIBUCIONES de polvo y gas a lo largo del eje mayor de la galaxia de Andrómeda. Las partículas de polvo suministran núcleos sobre los que se puede condensar el gas; se cree por ello que ambos tipos de materia son necesarios para la formación de estrellas. Las distribuciones concuerdan bastante bien hacia la región Nordeste del disco galáctico, pero no lo hacen hacia la parte Sur.

Bajaja ha investigado también el movimiento del hidrógeno neutro. Ha encontrado que discrepa de una trayectoria estrictamente circular. La más sencilla hipótesis acerca del movimiento de una galaxia espiral es que todas sus componentes giran alrededor del masivo centro galáctico. Se cree que las estrellas de la Población II se originaron antes de que una gran parte de la galaxia se condensase en forma de disco. Sus órbitas son fuertemente elípticas. En contraste, se presume que las órbitas de las estrellas jóvenes y del gas y polvo en el disco de la Población I son casi circulares, como las órbitas de los planetas alrededor del Sol.

Los nuevos descubrimientos muestran, sin duda, que esta hipótesis no se cumple en algunos casos. De los tres brazos aparentes de hidrógeno en la mitad Nordeste de la galaxia de Andrómeda, porciones del brazo más interno se están precipitando hacia el centro de la galaxia con una velocidad de al menos 100 kilómetros por segundo, además de su movimiento alrededor del centro. La causa de esta velocidad hacia el interior constituye un misterio. El brazo inmediatamente más externo ya no la presenta. ¿Está el movimiento no circular relacionado con la complicada dinámica de una deformación del disco galáctico? ¿Está producido por las galaxias compañeras, o es que algún suceso explosivo del pasado desorganizó esta parte de la galaxia? La respuesta quizá la revelen los datos crecientemente detallados que las distribuciones radiotelescópicas están ahora recogiendo.

Mientras el instrumento de Westerbork ha estado cartografiando la radioemisión del hidrógeno neutro a 21 centímetros, un radiotelescopio de antena única de 100 metros cerca de Bonn, en Alemania Occidental, ha permitido a Elly Berkhuijsen y sus colaboradores, del Instituto Max Planck de Radioastronomía, cartografiar la emisión a 11 centímetros y deducir la naturaleza de sus fuentes. Anteriormente, G. G. Pooley, de Cambridge, había mostrado que la mayor parte de la radioemisión a 11 centímetros procedente de la galaxia de Andrómeda provenía del centro de la galaxia y también de las porciones de los brazos espirales, que son brillantes en las imágenes ópticas.

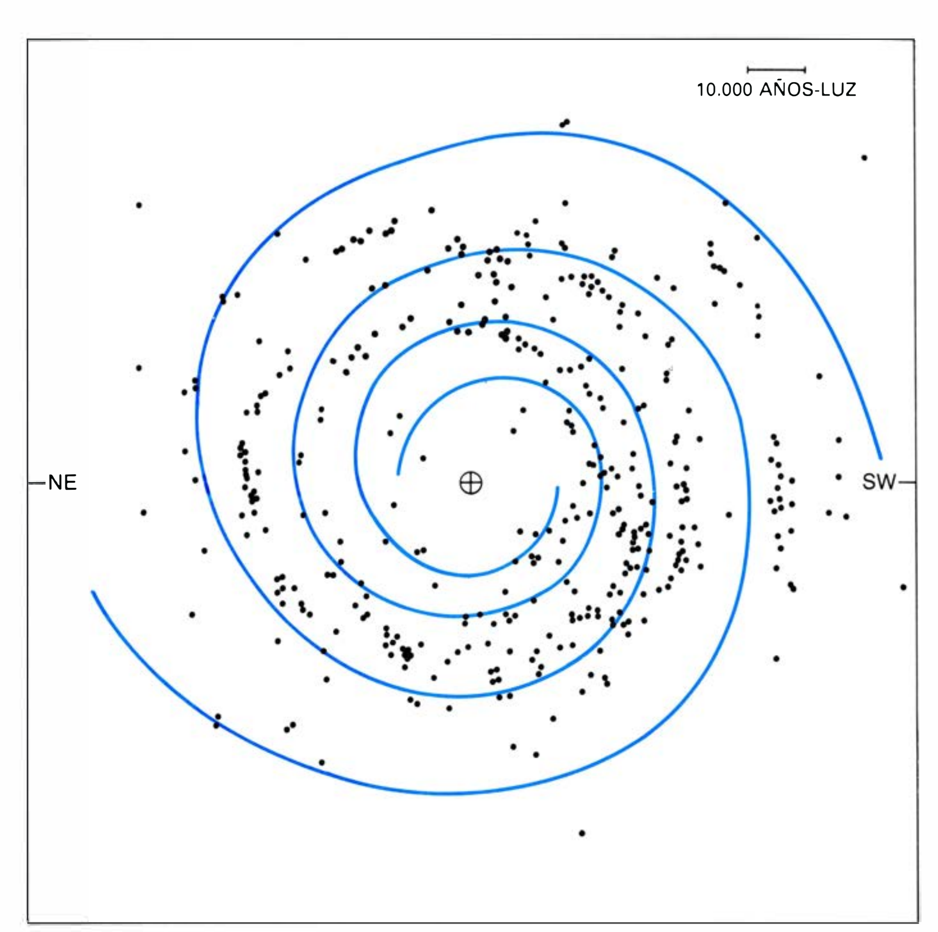
Piet van der Kruit, del Observatorio de Leiden, y Yervant Terzian junto con Bruce Balick y colaboradores, de la Universidad de Cornell, confirmaron los resultados de Pooley en otras longitudes de onda. También demostraron, a partir de la intensidad relativa de la

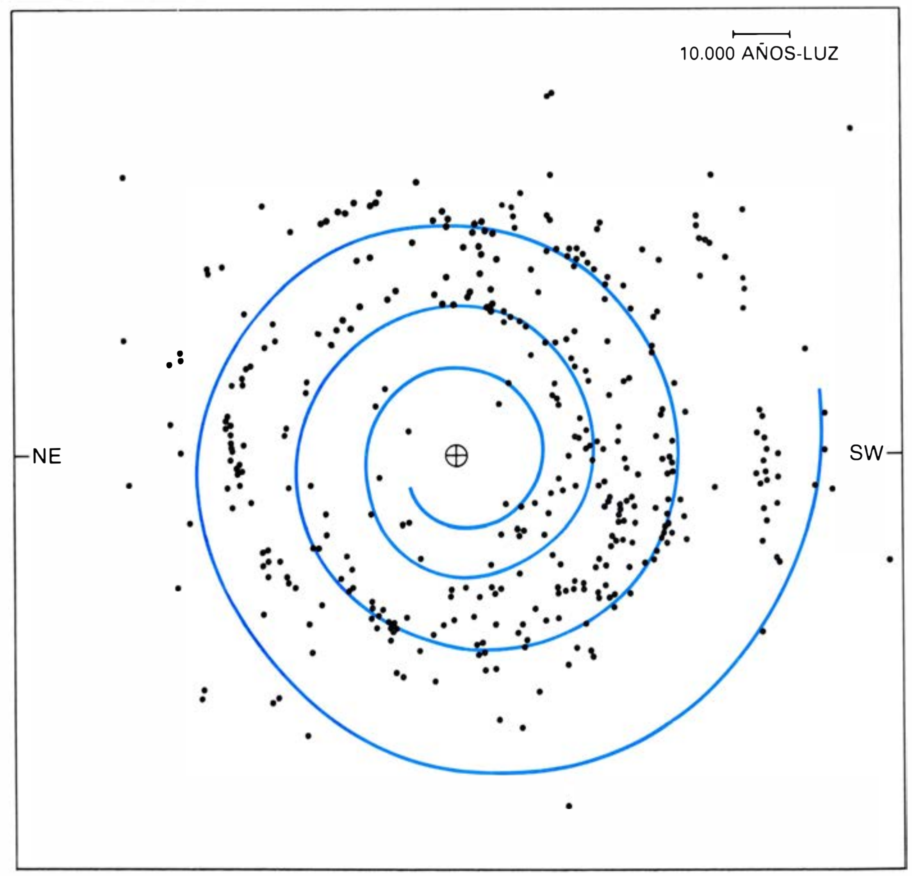
radiación a esas longitudes de onda, que una elevada proporción de la radiación no podía ser térmica. Una fuente de radiación térmica, imaginemos una nube de gas caliente, emite un ruido en la banda de radio cuyo espectro muestra una subida y bajada características, determinadas por el tamaño y temperatura de la nube. Las intensidades registradas por los investigadores de Cornell no se ajustan a esa forma. Antes bien, una fracción notable de la radiación debe ser generada por un mecanismo no térmico. Podría, por ejemplo, ser radiación de sincrotón, que se origina por electrones que se mueven a velocidad próxima a la de la luz en el seno de un campo magnético. La radiación de sincrotón abarca ondas electromagnéticas con casi igual intensidad desde rayos X hasta ondas largas de radio. Se origina en lugares donde se liberan grandes cantidades de energía, tales como la vecindad de explosiones de supernova y los objetos masivos ultracompactos (estrellas de neutrones o agujeros negros) que se cree tales explosiones dejan tras de sí.

Los mapas de Berkhuijsen pusieron de manifiesto que la radiación térmica proviene principalmente de la vecindad de la rosquilla de hidrógeno neutro, a unos 30.000 años-luz del centro de la galaxia de Andrómeda. Probablemente la emiten las numerosas nubes de gas caliente que abundan allí. La radiación no térmica surge de una fuente más amplia. Muestra una fuente con un abrupto máximo en el centro de la galaxia, pero se extiende, con intensidad poco variable, hasta una distancia del centro desde 40.000 a 50.000 años-luz. Los restos de supernova en la galaxia de la Vía Láctea (y los siete restos descubiertos hasta ahora en la galaxia de Andrómeda por Vera C. Rubin, Cidambi K. Kumar y W. Kent Ford, Jr., del Departamento de Magnetismo Terrestre de la Institución Carnegie de Washington) ofrecen una distribución semejante. Así, la radiación térmica puede explicarse en gran parte como el ruido combinado de los restos de supernovas, incluyendo quizá la espectacular S Andrómeda, 1885.

Otros objetos

Hay una especie de brillante nube gaseosa que se cree es la atmósfera exterior desprendida de una estrella envejecida o moribunda. El anillo se llama nebulosa planetaria porque, aunque nebuloso, su imagen se asemeja a la de un planeta en que es compacta y parecida a un disco. Baade halló cinco





LA CONTROVERSIA DEL BRAZO ESPIRAL surgió cuando Halton C. Arp, de los Observatorios Hale, vio en la galaxia de Andrómeda una forma espiral con dos brazos (*arriba*), mientras que Agris Kalnajs, del Observatorio del Monte Stromlo en Australia, distinguió una configuración de un solo brazo (*abajo*), con el brazo extendiéndose hacia afuera en la dirección opuesta. (La galaxia gira en sentido antihorario cuando el disco galáctico se mira, como aquí, desde abajo.) Los puntos marcan las posiciones de cúmulos sueltos, formados por estrellas jóvenes. Estas forman los segmentos de brazos espirales.

de tales objetos en la galaxia de Andrómeda; sin embargo, se han descubierto allí en grandes cantidades sólo en los dos o tres últimos años. Holland Ford y George Jacoby, de la Universidad de California en Los Angeles, han aprovechado nuevas técnicas de filtrado e intensificación de la imagen para registrar imágenes que Baade no habría podido registrar por ser demasiado débiles. Con el telescopio de 3 metros del Observatorio Lick hallaron 315 nebulosas planetarias. Calculan ellos que el número total en la galaxia de Andrómeda será de unas 10.000. Puesto que las nebulosas planetarias indican estrellas moribundas, tales nebulosas cartografían los lugares de degeneración de la galaxia. Al parecer, en el núcleo central de la galaxia están muriendo unas cinco estrellas por siglo. A lo largo de los últimos miles de millones de años, el gas así liberado debe haberse acumulado en un disco gaseoso que gire alrededor del núcleo. Los radioastrónomos han hallado un disco central de gas cuya masa viene a ser la esperada.

Una aplicación similar de los modernos filtros e intensificadores de imagen ha conducido a ciertos progresos en la exploración de las nubes de gas caliente en la galaxia de Andrómeda. Recientemente, un grupo francés dirigido por G. Courtés ha acometido una exploración muy superior a la tarea realizada por Baade en los años 50, empleando el telescopio de dos metros del Observatorio de Haute-Provence. Las velocidades de las nubes, que se han medido, junto con las velocidades del hidrógeno neutro, proporcionan ahora una interpretación clara de la rotación de la galaxia. Además, la velocidad de un objeto en órbita depende de la cantidad de masa situada dentro de la órbita así como de la masa próxima al objeto; a partir, pues, de las velocidades orbitales de los objetos en la galaxia de Andrómeda podemos deducir la distribución de la masa en la galaxia. Los intentos más recientes encaminados a deducir la masa total conducen a valores entre 200.000 y 400.000 millones de veces la masa del Sol, lo que representa el doble de la masa de la Vía Láctea. Aun así, la velocidad orbital del hidrógeno en las regiones periféricas de la galaxia de Andrómeda sugiere que grandes cantidades de materia invisible pueden formar un gigantesco halo.

Una manera de someter a prueba el valor actualmente aceptado de la masa de la galaxia de Andrómeda sería medir la interacción gravitatoria de la masa de la galaxia con algunos otros objetos, preferiblemente objetos situados a grandes distancias del centro galáctico. Comprendiendo que los cúmulos globulares en la Población II de la galaxia podían ser los objetos que se necesitaban, F. D. A. Hartwick, de la Universidad de Victoria, Sidney van den Bergh, del Instituto Herzberg de Astronomía en Victoria, y Wallace L. W. Sargent, del Instituto de Tecnología de California, colaboraron recientemente en una búsqueda de los cúmulos globulares en placas fotográficas tomadas con el nuevo telescopio de cuatro metros del Observatorio Nacional de Kitt Peak, en Arizona. Han catalogado 355 cúmulos globulares probables, duplicando el número descubierto anteriormente por diversos astrónomos, desde Hubble en adelante. Los 335 cúmulos globulares vienen a triplicar la cifra de los que se sabe existen en la Población II de la galaxia de la Vía Láctea. La abundancia de cúmulos globulares constituye por sí misma una prueba de que la masa de la galaxia de Andrómeda es grande. Pero no se han determinado todavía las órbitas de los cúmulos: la cuestión de la masa total sigue pendiente.

Se sabe, como consecuencia de un estudio de los espectros y de los colores de los más brillantes cúmulos globulares realizados por van den Bergh, que la primitiva historia de la galaxia de Andrómeda debe haber sido enigmáticamente diferente de la historia de la galaxia de la Vía Láctea. En la galaxia de la Vía Láctea, los cúmulos globulares de las regiones periféricas son muy pobres en elementos pesados. El Sol es mucho más rico. Esta diferencia se interpreta corrientemente como parte de una pauta general. Las estrellas antiguas de la Población II son casi puramente hidrógeno y helio, los elementos creados en abundancia en el primitivo universo, mientras que el disco de estrellas de la Población I, más joven, incluye residuos procedentes de una multitud de estrellas moribundas que sintetizaron elementos pesados por fusión termonuclear. Sorprendentemente, los espectros de los cúmulos globulares de la galaxia de Andrómeda revelan una amplia diversidad de comportamientos por lo que respecta a la abundancia de elementos pesados, sin que medie relación alguna entre la abundancia de elementos pesados en un cúmulo y la posición de éste en la galaxia.

La controversia de los brazos espirales

Se han encontrado también cúmulos de otra clase en la galaxia de Andrómeda. Se trata de los cúmulos abiertos, o agrupaciones sueltas de estrellas. Los cúmulos abiertos son más jóvenes que los cúmulos globulares, y descansan en el plano de la galaxia, junto con el resto de la Población I. Salvo un par de ejemplos identificados por Hubble, no se habían localizado en la galaxia de Andrómeda. Pero el año pasado, al poder aprovechar el amplio campo visual del nuevo telescopio de cuatro metros en el Observatorio Nacional de Kitt Peak para explorar la galaxia, llegué a identificar 403 ejemplares.

La mayoría de los 403 sólo tienen unos 60 años-luz de diámetro. A pesar de lo cual, me han permitido iniciar la reconstrucción de la historia reciente de la formación de estrellas en la galaxia de Andrómeda. El punto crucial es la probabilidad de que las estrellas de un cúmulo abierto se formen todas a la vez. Por otro lado, la distribución de los diferentes tipos de estrellas en el cúmulo cambia a lo largo de intervalos de tiempo determinados. Así, un conjunto particular de estadísticas implica una edad particular. De esta manera he mostrado que la velocidad de formación de estrellas ha variado a lo largo del diámetro del disco de la galaxia de Andrómeda. Velocidad que recientemente ha alcanzado un valor anormalmente elevado a unos 30.000 años-luz del centro, donde se concentran el hidrógeno neutro y las estrellas brillantes.

En la controversia sobre la configuración de los brazos espirales de la galaxia de Andrómeda se mira ahora a los cúmulos abiertos. El primer intento por delimitar los brazos se debió a Halton C. Arp, de los Observatorios Hale, quien basó su trabajo en la distribución de nubes de gas por la galaxia. Arp halló que una espiral de dos brazos, los cuales se comportaran como estelas en la dirección de giro de la galaxia, se ajustaba bastante bien a la dispersa información observacional de que se disponía. Sugirió que la imperfección del ajuste podría obedecer a la perturbación gravitatoria del disco galáctico por M32, una de las cuatro compañeras de la galaxia de Andrómeda.

Un reciente análisis realizado con ayuda de ordenador por Gene G. Byrd, de la Universidad de Alabama, parece confirmar esto, así como explicar la caída hacia el interior observada en la distribución de hidrógeno neutro. Por otra parte, Agris Kalnajs, del Observatorio del Monte Stromlo en Australia, ha llegado a la conclusión, a partir de la distribución de las nubes de hidrógeno, de que la galaxia tiene sólo un brazo espiral y que la espiral se desarrolla en la

dirección opuesta a la de los dos brazos construidos por Arp. Se trata, por tanto, de un brazo guía: su extremo libre apunta en la dirección de la rotación de la galaxia.

No existe ningún ejemplo inequívoco de una galaxia espiral con un solo brazo guía en cualquier otro lugar del universo. Kalnajs ha hecho notar que quizá la razón de ello se encuentra en la presencia de M32. Si el período de rotación de la galaxia de Andrómeda y el período de rotación de M32 alrededor de ella poseen un divisor común, la resonancia gravitatoria entre las dos galaxias podría dar lugar al brazo guía. Recientemente, un grupo de astrónomos franceses, suizos y griegos examinó un gran conjunto de datos sobre las posiciones de los objetos de la Población I e intentó discernir una estructura espiral. También ellos llegaron a la conclusión de que se obtenía el mejor ajuste mediante un brazo guía único.

La controversia está todavía sin resolver. Aunque la distribución de nubes de gas parece ajustarse bastante bien a la configuración de brazo único, la distribución de cúmulos abiertos sólo encaja en la hipótesis de una espiral de dos brazos gravitatoriamente deformada. Además, las nubes de polvo no se ajustan bien a configuración espiral alguna. La discrepancia muestra cuán imperfectas son la mayoría de las configuraciones espirales galácticas y también cuán imperfecto es nuestro conocimiento de las espirales galácticas.

La galaxia de Andrómeda continúa siendo objeto de observaciones que se hacen posibles mediante nuevas técnicas y de exploraciones en busca de ejemplos de tipos de objetos recién descubiertos. Existen ahora mapas que cartografían la distribución de monóxido de carbono en la galaxia de Andrómeda: muestran que está estrechamente correlacionada con la distribución de hidrógeno neutro. El año pasado, sin ir más lejos, el Observatorio Orbital Einstein de Rayos X detectó 69 fuentes de rayos X en la galaxia de Andrómeda. Los astrónomos del Centro de Astrofísica del Harvard College Observatory y del Observatorio Astrofísico Smithsoniano creen que unas fuentes son cúmulos globulares, otras concentraciones de objetos de la Población I y las hay que son restos de supernovas. Tal vez pronto se descubra la naturaleza precisa de los procesos de alta energía que dan lugar a la radiación. La galaxia de Andrómeda ha proporcionado a los astrónomos un rico filón de información. No hay duda de que revelará mucho más todavía.

Los recursos genéticos del trigo silvestre

Las prácticas modernas de mejora han reducido la variabilidad genética de los trigos cultivados. La esperanza de futuras mejoras de esta planta se funda en la explotación del abundante acervo genético de las especies silvestres próximas

Moshe Feldman y Ernest R. Sears

La producción mundial de trigo ha aumentado enormemente durante las últimas décadas. Pero será preciso incrementarla todavía más si se quiere dar alimento a una población creciente. El próximo aumento significativo de los recursos alimentarios habrá de conseguirse, principalmente, a través de nuevas mejoras en la productividad del trigo, ya que no es probable que se pueda disponer de nuevas tierras cultivables en extensión suficiente para resolver el problema, y la aplicación de ayudas agrícolas de alta energía, tales como los fertilizantes, pesticidas y herbicidas se está haciendo prohibitiva por su encarecimiento. Se necesita, pues, con apremiante urgencia, desarrollar nuevas variedades de trigo de superior rendimiento o con mejor aptitud para su cultivo en áreas donde no se cosecha aún este cereal.

El esfuerzo se ve limitado por dos factores. El primero es el hecho de que el material genético de los trigos cultivados se ha explotado ya con fines de mejora casi hasta su capacidad límite. El segundo consiste en que la amplitud de variación genética de los trigos cultivados ha disminuido drásticamente en los últimos años. La rápida y continuada erosión del acervo genético del trigo no sólo reduce la posibilidad de nuevos progresos en la productividad, sino que también hace que la cosecha triguera mundial sea cada vez más vulnerable a nuevas enfermedades y a cambios climáticos adversos.

La variabilidad genética de los trigos domesticados, que ha ido acumulándose en el transcurso de 10.000 años de cultivo, se ha visto disminuida por la puesta en práctica de técnicas de mejora modernas y científicamente planeadas. (Estas mismas técnicas son, por supuesto, las responsables en gran parte de la elevada productividad actual del trigo.) Durante varias décadas se han seleccionado variedades nuevas y mejoradas de trigo a expensas de la variabilidad genética mundial de esta planta. Las nuevas variedades, formadas cada una por un solo genotipo, han ido reemplazando de modo continuo a las "variedades locales" tradicionales, que estaban constituidas por muchos genotipos diferentes.

El abandono de la conservación de las variedades cultivadas primitivas ha dado ya como resultado la pérdida de una reserva sustancial de la variabilidad genética. Los intentos por aumentar la variabilidad de los nuevos tipos cultivados por medio de mutaciones inducidas mediante radiaciones ionizantes, como los rayos X, o mediante tratamientos químicos, han tenido poco éxito. La conservación del germoplasma de los trigos cultivados primitivos supervivientes puede mitigar el peligro de una mayor erosión genética. Sin embargo, la restauración y enriquecimiento a gran escala del acervo genético de los trigos cultivados solamente puede lograrse acudiendo a los amplios recursos genéticos que se encuentran en las especies silvestres próximas al trigo.

Los trigos cultivados pertenecen a cuatro especies del género *Triticum,* todas las cuales contienen un múltiplo del juego básico haploide de siete cromosomas por gameto, o célula reproductora. La especie de número cromosómico más bajo, *T. monococcum,* es normalmente diploide, es decir, tiene dos juegos de siete, o sea 14, cromosomas en cada célula somática. (Esto equivale a decir que esta especie lleva siete pares de cromosomas.) Otras dos especies, *T. turgidum* y *T. timopheevi,* son tetraploides: tienen 28 cromosomas (cuatro veces siete, o sea, 14 pares) cada una. La especie cultivada de *Triticum* con número cromosómico más alto, *T. aestivum,* es hexaploide: tiene un total de 42 cromosomas (seis veces siete, o sea, 21 pares).

De los cuatro trigos cultivados, el *T. aestivum* es, con diferencia, el más importante económicamente. La mayoría de sus variedades modernas caen bajo la denominación general de trigo común, cuya harina es la más adecuada para el pan. El *T. aestivum* incluye más de 20.000 cultivares (variedades cultivadas), que se adaptan a un amplio intervalo de ambientes.

El *T. aestivum* se cultiva en todo el mundo. Del mismo modo, el trigo tetraploide *T. turgidum,* y en particular su principal variedad moderna *T. turgidum durum* (trigo duro o semolero), se cosecha ampliamente en áreas relativamente secas del mundo, tales como la cuenca mediterránea, India, la Unión Soviética y las zonas de escasa pluviometría de las grandes llanuras de Norteamérica. En cambio, el cultivo del *T. timopheevi* tetraploide y del diploide *T. monococcum* es bastante limitado: el *T. timopheevi* se cultiva sólo en algunos lugares de la región transcaucásica de la Unión Soviética y el *T. monococcum,* únicamente en algunas regiones montañosas de Yugoslavia y de Turquía, donde se utiliza sobre todo para alimentación animal.

Las especies silvestres relacionadas con el trigo que pueden cruzarse con estas especies domesticadas y, por tanto, pueden servir como donantes potenciales de caracteres deseables (caracteres hereditarios), pertenecen a la tribu Triticeae de la familia de las Gramineae o gramíneas. Esta tribu, que es la división más importante, desde el punto de vista económico, de las gramíneas, ha dado origen no sólo a los trigos cultivados sino también al centeno (*Secale*) y la cebada (*Hordeum*). La tribu

TRIGO SILVESTRE perteneciente a la variedad *Triticum turgidum dicoccoides* (conocido también por escaña silvestre) que crece paralelo a una carretera cerca del mar de Galilea, al norte de Israel, según puede verse en esta fotografía hecha por Shalom Nedam, del Instituto Weizmann de Ciencia. Las espigas de las plantas silvestres muestran una amplia gama de colores, desde un obscuro casi negro hasta blanco. También pueden apreciarse diferencias en la talla. Se cree que una variedad primitiva cultivada de esta especie, *T. turgidum dicoccum*, fue uno de los dos parentales del trigo común, *T. aestivum*.

TRIGO CULTIVADO. Uno de los cultivares modernos (de los que hay más de 20.000) de la especie *T. aestivum* (trigo común panadero), fotografiado por Nedam en el valle de Yavne'el, al este del mar de Galilea. Se aprecia poca o ninguna variabilidad de planta a planta en cuanto al color o la talla.

Triticeae incluye 14 géneros que se agrupan, por razón de sus características morfológicas, en dos subtribus, las Triticinae y las Hordeinae [*véase la ilustración inferior de la página siguiente*].

Dentro de ambas subtribus, los miembros de diferentes géneros pueden formar híbridos en algún momento, lo que facilita el flujo génico, sea por el proceso conocido como entrecruzamiento (llamado a veces también sobrecruzamiento, consiste en el intercambio de material genético entre cromosomas homólogos o muy estrechamente relacionados), sea a través de la creación de una especie anfiploide, esto es, un híbrido interespecífico fértil que lleva un juego completo de pares cromosómicos derivado de cada especie parental. Por ejemplo, dentro de la subtribu Triticinae pueden cruzarse con el trigo común o con el duro no sólo las otras especies de *Triticum*, sino incluso especies pertenecientes a otros géneros, dando origen a híbridos viables. Recientemente se ha dado a conocer el éxito obtenido en algunos intentos de hibridaciones todavía más distantes, entre especies de la subtribu Hordeinae y el trigo. Estos hallazgos indican que la variación genética de toda la tribu Triticeae es potencialmente explotable para la mejora del trigo.

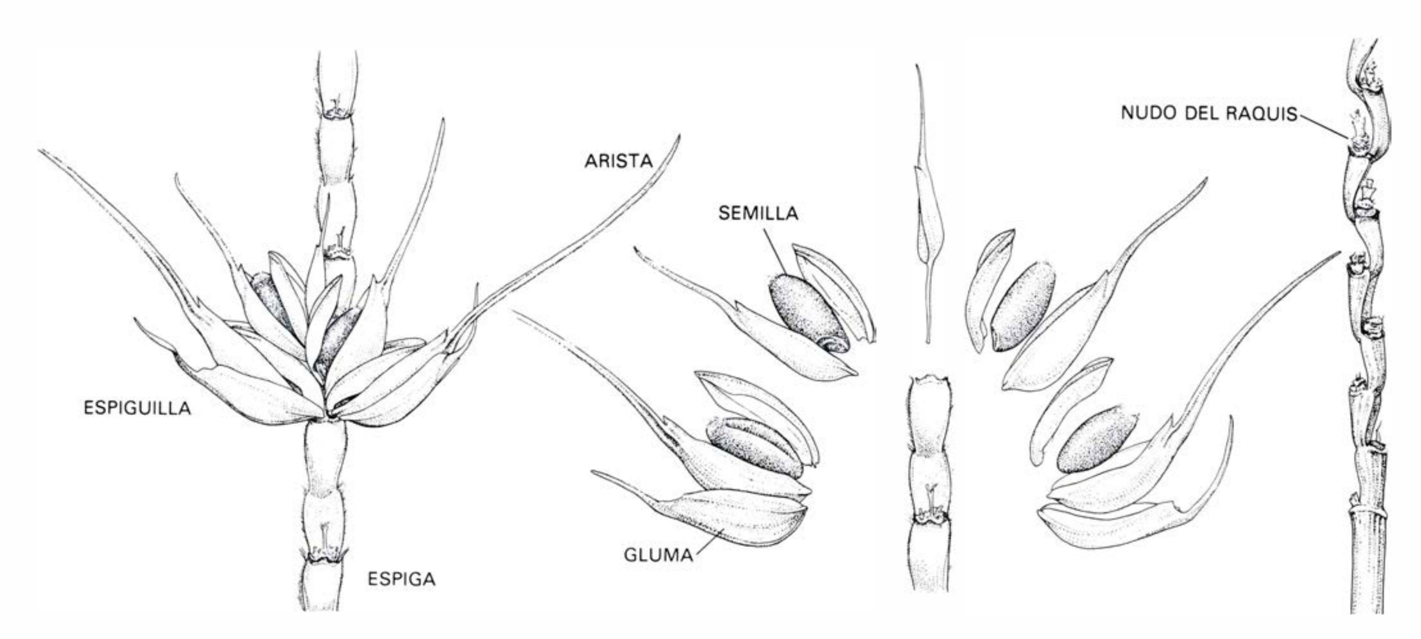
Disponemos ya de una buena cantidad de información biológica básica acerca de las especies silvestres emparentadas con el trigo, en particular de las que conforman el género *Triticum*. Las diversas especies silvestres de *Triticum* se distribuyen también entre los mismos tres niveles de ploidía que las especies cultivadas: el diploide (con siete pares de cromosomas), el tretraploide (con 14 pares) y el hexaploide (con 21). Aunque las especies silvestres diploides descienden, a buen seguro, de un antepasado común, han divergido bastante unas de otras, no sólo en su morfología, sino también ecológica y geográficamente. Los estudios cromosómicos han corroborado la clasificación taxonómica demostrando que casi todas las especies diploides tienen un complemento distinto de genes, un genoma diferente. Los cromosomas relacionados de los diferentes genomas muestran entre sí grados variables de una afinidad reducida, por lo que no se aparean regularmente cuando las células formadas en una hibridación interespecífica emprenden la meiosis (la división celular que reduce el número de cromosomas en los gametos de los organismos que tienen reproducción sexual). Este factor tiende a hacer estériles a estos híbridos y conduce finalmente al aislamiento genético de las diversas especies diploides entre sí.



ESPIGUILLAS DE TRIGO SILVESTRE, desparramadas por el suelo después de la fragmentación de las espigas en su madurez. La principal diferencia entre los trigos silvestres (representados aquí por el *T. turgidum dicoccoides*) y sus derivados cultivados radica en que las espigas de las especies silvestres, en la madurez, tienden a romperse en sus espiguillas componentes, que caen al suelo. Algunas de las espiguillas que se ven en esta fotografía se han enterrado parcialmente en el suelo, por acción de sus aristas (prolongaciones terminales a modo de barbas) y en respuesta a la humedad; esto proporciona a las semillas englobadas unas condiciones favorables para su germinación y supervivencia. Aunque el desgrane espontáneo en la madurez es esencial para los trigos silvestres como mecanismo primario de dispersión de la semilla, debe haber constituido una gran molestia para los primeros recolectores de trigo. No es extraño, por tanto, que los primeros cultivadores de trigo seleccionaran mutantes de espiga tenaz cuando éstos aparecieron, convirtiendo así el trigo silvestre en el cultivado, incapaz de sobrevivir sin ayuda.

Las especies poliploides de *Triticum* (aquellas cuyos niveles ploídicos son superiores a dos) constituyen un clásico ejemplo de evolución por anfiploidía. Su comportamiento es típico de la clase de híbridos conocidos por los genetistas como alopoliploides genómicos: sus cromosomas se aparean como en un diploide (formando en la meiosis solamente bivalentes, o sea, cromosomas en pares); su modo de herencia es disómico (por el apareamiento de cromosomas relacionados). La naturaleza alopoliploide de los poliploides de *Triticum* la han comprobado varios investigadores mediante el análisis de los genomas de los híbridos formados entre especies de diferente nivel ploídico. Por ejemplo, toda especie tetraploide puede identificarse como el producto de la hibridación de dos especies diploides seguida de una duplicación espontánea de sus cromosomas. Del mismo modo, toda especie hexaploide es el producto de la hibridación entre una especie tetraploide y otra diploide, seguida de duplicación cromosómica.

En el género *Triticum* se reconocen tres grupos de poliploides. Dentro de cada grupo las especies tienen un genoma común y difieren en otro (u otros). Por ejemplo, los poliploides del grupo



ANATOMIA DE UNA ESPIGUILLA de trigo común, detallada en una serie de dibujos. La espiga se compone de nudos de raquis alternos, cada uno de los cuales es portador de una sola espiguilla (*izquierda*). La disección de la espiguilla muestra que contiene varias semillas o granos (*centro*). La alternancia de los nudos del raquis se ve con mayor claridad en visión lateral (*derecha*). En algunas variedades faltan las aristas, que son prolongación de las glumas.

A comparten el genoma de *T. monococcum,* su antecesor diploide común, los del grupo *D* comparten el del trigo silvestre *T. tauschii* y los del grupo *U* comparten el genoma de otro trigo silvestre, *T. umbellulatum.* En lo que respecta a su morfología básica, y particularmente a la estructura de los mecanismos de dispersión de semillas, los poliploides de cada grupo se asemejan al diploide donante del genoma central. Esta estructura genética característica (un genoma común y otro, u otros dos, diferentes) es la responsable de que entre los poliploides se dé con éxito un nivel relativamente alto de hibridación espontánea (y por tanto, de flujo génico). Las hibridaciones de este tipo están facilitadas por el genoma compartido, que actúa de amortiguador, asegurando algo de fertilidad en los híbridos resultantes. En tales casos, los dos genomas diferentes que se ponen en contacto, aportados por diferentes parentales, pueden intercambiar material genético y formar un genoma mixto, nuevo. De este modo, en cada grupo de especies poliploides existe una variación casi continúa entre las características de los diferentes genomas.

SUBTRIBU	GENERO	NUMERO DE ESPECIES	NIVEL PLOIDICO (X = 7)	HABITO DE CRECIMIENTO: PERENNE	HABITO DE CRECIMIENTO: PERENNE, ANUAL	HABITO DE CRECIMIENTO: ANUAL	MODO DE POLINIZACION: ALOGAMA	MODO DE POLINIZACION: AUTO-ALOGAMA	MODO DE POLINIZACION: AUTOGAMA	DISTRIBUCION DE LAS ESPECIES SILVESTRES	HIBRIDACIONES CONSEGUIDAS CON TRITICUM
HORDEINAE	*Hordeum*	25	2X–6X		■			■		Todo el mundo (ártico-templado)	■
	Elymus	60	2X–12X	■				■		Todo el mundo (ártico-templado)	■
	Asperella	7		■			■			Todo el mundo (ártico-templado)	
	Sitanion	1	4X	■			■			América del Norte (ártico-templado)	
	Psathyrostachys	6		■			■			Cuenca mediterránea, Asia central	
	Crithopsis	1	2X			■			■	Cuenca mediterránea, Asia central	
	Taeniatherum	2	2X			■			■	Cuenca mediterránea, Asia central	■
TRITICINAE	*Agropyrum*	100	2X–10X	■			■			Todo el mundo (ártico-templado)	■
	Haynaldia	2	2X, 4X		■		■			Cuenca mediterránea, Asia central	■
	Secale	6	2X		■		■			Cuenca mediterránea, Asia central	■
	Heteranthelium	1	2X			■			■	Cuenca mediterránea, Asia central	
	Henrardia	2	2X			■			■	Cuenca mediterránea, Asia central	
	Eremopyrum	5	2X, 4X			■			■	Cuenca mediterránea, Asia central	■
	Triticum	27	2X–6X			■		■		Cuenca mediterránea, Asia central	■

CATORCE GENEROS de la tribu Triticeae, división importante de las Gramineae o gramíneas, pueden agruparse y formar dos subtribus: las Hordeinae y las Triticinae. Para su inclusión se ha seguido un criterio morfológico. Los miembros de la subtribu Hordeinae, tales como la cebada (*Hordeum*), se distinguen porque tienen dos o tres espiguillas en cada nudo del raquis; los de la subtribu Triticinae, tales como el centeno (*Secale*) y el trigo (*Triticum*), tienen típicamente una sola espiguilla por nudo del raquis. De cada género se dan cierto número de especies, con su nivel ploídico correspondiente, es decir, el número de cromosomas de cada célula somática, expresado como múltiplo del número cromosómico haploide (*X*), que corresponde a un gameto o célula reproductora. (Todos los miembros de la tribu Triticeae tienen un número cromosómico haploide básico de siete.) Se señala, también, el hábito de crecimiento típico, el modo predominante de polinización y la distribución geográfica. A la derecha, se relacionan géneros cuya hibridación con *Triticum* es viable.

La estructura constitutiva de las especies poliploides de *Triticum* permite una elaboración rápida de diversidad genética. En tales especies, la mayoría de los loci génicos están presentes en cuatro o seis copias (versiones duplicadas), y la acumulación de variación genética mediante mutación o hibridación se tolera más fácilmente que si se tratase de un organismo diploide. La poliploidía facilita así la diploidización genética, proceso a través del cual los genes presentes en copias múltiples y pares pueden divergir hacia nuevas funciones. Puesto que los poliploides de *Triticum* son verdaderos alopoliploides, muestran una heterosis ("vigor híbrido") permanente, efecto resultante de la interacción entre ciertos genes situados en loci homólogos de diferentes genomas.

En el género *Triticum* las especies poliploides, tanto silvestres como cultivadas, se caracterizan por una evolución convergente (esto es, la evolución adaptativa de estructuras superficialmente similares en especies no relacionadas sometidas a ambientes parecidos); este proceso se explica porque contienen material genético de dos o tres genomas diploides diferentes y pueden intercambiar genes entre ellas mediante hibridación. En este contex-

	ESPECIES	FORMULA GENOMICA	DISTRIBUCION
DIPLOIDES	*T. monococcum boeoticum*	*AA*	Sudoeste asiático, Balcanes
	T. monococcum urartu	*AA*	Sudoeste asiático
	T. dichasians	*CC*	Sudoeste asiático, Grecia
	T. tauschii	*DD*	Sudoeste asiático, Asia central
	T. comosum	*MM*	Grecia, Turquía
	T. tripsacoides	*MtMt*	Turquía
	T. uniaristatum	*MuMu*	Balcanes, Turquía
	T. speltoides	*SS*	Sudoeste asiático
	T. bicorne	S^bS^b	Sudoeste asiático, Africa septentrional
	T. sharonensis	S^lS^l	Sudoeste asiático
	T. longissimum	S^lS^l	Sudoeste asiático, Egipto
	T. searsii	S^sS^s	Sudoeste asiático
	T. umbellulatum	*UU*	Sudoeste asiático (¿Grecia?)
POLIPLOIDES QUE COMPARTEN EL GENOMA *AA*	*T. turgidum dicoccoides*	*AABB*	Sudoeste asiático
	T. timopheevii araraticum	*AAGG*	Sudoeste asiático
	T. aestivum	*AABBDD*	Todo el mundo (cultivado)
POLIPLOIDES QUE COMPARTEN EL GENOMA *DD*	*T. cylindricum*	*DDCC*	Sudoeste asiático, Balcanes, Asia central
	T. crassum	$DDM^{cr}M^{cr}$	Sudoeste asiático, Asia central
	T. crassum	$DDD_2D_2M^{cr}M^{cr}$	Asia central
	T. syriacum	$DDM^{cr}M^{cr}S^lS^l$	Sudoeste asiático
	T. juvenale	$DDM^{cr}M^{cr}UU$	Sudoeste asiático, Asia central
	T. ventricosum	DDM^vM^v	S. de Europa, Africa septentrional
POLIPLOIDES QUE COMPARTEN EL GENOMA *UU*	*T. triunciale*	*UUCC*	Sudoeste asiático, Europa meridional
	T. macrochaetum	UUM^bM^b	Sudoeste asiático, S. de Europa, U.R.S.S.
	T. columnare	UUM^cM^c	Sudoeste asiático
	T. triaristatum	UUM^tM^t	Sudoeste asiático, S. de Europa, Africa septentrional
	T. triaristatum	$UUM^tM^tM^{t2}M^{t2}$	Sudoeste asiático, S. de Europa, Africa septentrional
	T. ovatum	UUM^oM^o	Sudoeste asiático, Asia central, S. de Europa, Africa septent.
	T. variabile	UUS^vS^v	Sudoeste asiático, Africa septent., Italia, Grecia
	T. kotschyi	UUS^vS^v	Sudoeste asiático, Africa septentrional

RELACION DE ESPECIES DE TRITICUM, juntamente con sus fórmulas genómicas y la distribución de sus especies silvestres. Se han incluido sólo las formas silvestres, excepto para el trigo hexaploide *T. aestivum*, del que no se conocen variedades silvestres. En la matriz en color, a la derecha, se han ordenado los acervos genéticos silvestres de las especies de *Triticum* atendiendo a su grado de relación filogenética con el trigo común (*color intenso*). Entre las especies de parentesco próximo cuyos genomas son homeólogos (semejantes pero no homólogos o idénticos) de los de *T. aestivum* se encuentra *T. searsii*, el

to, el significado evolutivo de la poliploidía surge sobre todo del hecho de haber facilitado la formación de una superestructura genética que reúne los genes de especies diploides aisladas y permite su recombinación. La poliploidía ha demostrado ser, además, un sistema genético eficaz, reforzado por un sistema de reproducción en el que predomina la autofecundación. La ventaja evolutiva de los poliploides sobre los diploides se refleja en la amplia variación morfológica y ecológica de los primeros. No es de extrañar, por tanto, que los trigos poliploides cultivados muestren un amplio espectro de flexibilidad genética y que hayan logrado adaptarse a una gran variedad de ambientes distintos.

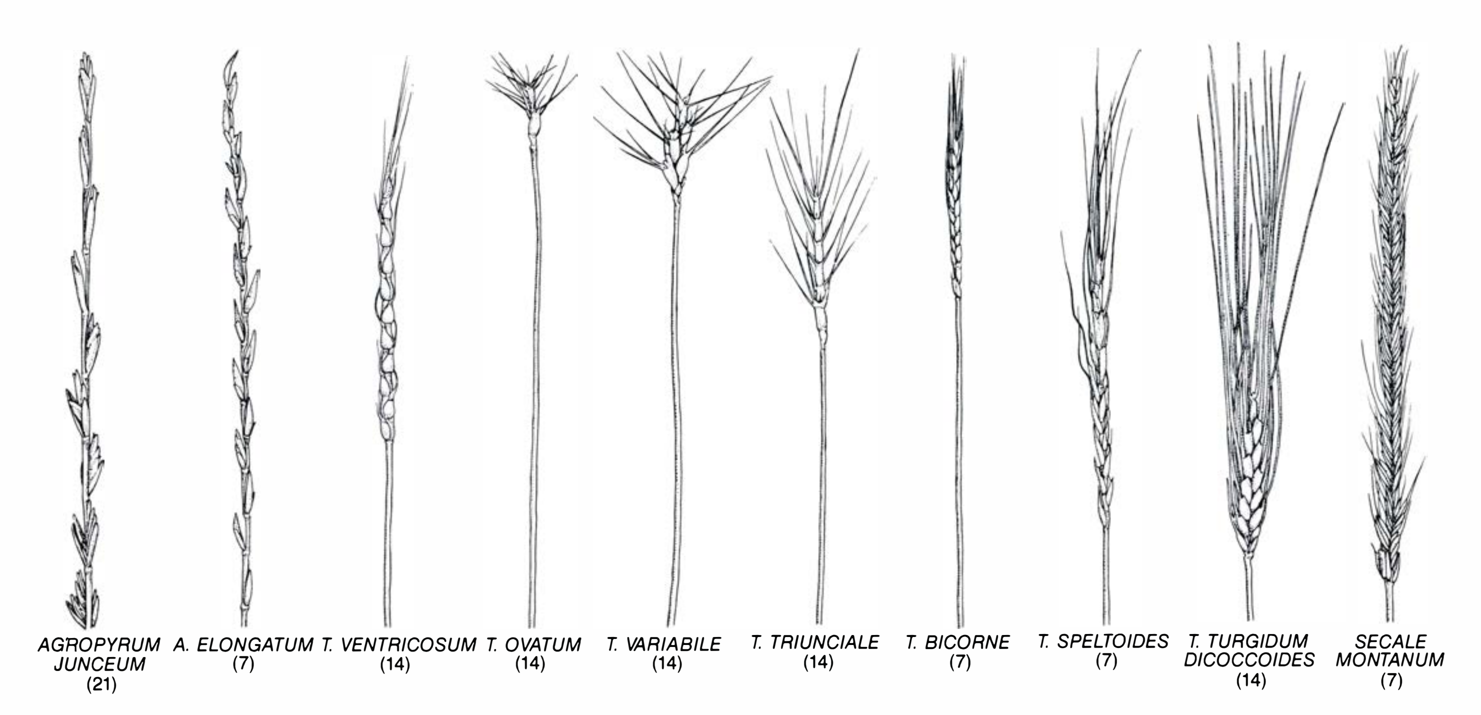
El centro de origen y el principal núcleo de diversidad del género *Triticum* se encuentra en el sudoeste de Asia, especialmente en los cinturones de robledales de los países montañosos del Creciente Fértil, que se extienden desde las costas del Mediterráneo, por el oeste, a través del desierto sirio, hasta la llanura del Tigris y el Eufrates, por el este. En esta región hay una rica concentración de especies de *Triticum*, tanto diploides como poliploides, que muestran un espectro considerable de variación morfológica y ecológica. En muchos casos, las especies se desarrollan en poblaciones polimórficas o mixtas, circunstancia que aumenta la frecuencia de hibridaciones espontáneas y facilita el flujo génico, tanto interespecífico como intraespecífico. Estas interconexiones genéticas dinámicas conducen a la creación de una riqueza de variación genética y hacen de la región un centro activo de evolución.

Recordemos que los tipos poliploides cultivados pertenecen a tres especies diferentes: dos tetraploides, *T. turgidum* y *T. timopheevi* y una hexaploide, *T. aestivum*. ¿Cómo y dónde se originaron estas especies? Los intensos estudios citogenéticos llevados a cabo sugieren que *T. turgidum* (genoma *AABB*) derivó de un cruzamiento entre *T. monococcum* (genoma *AA*) y *T. searsii* (genoma $S^s S^s$) o una especie silvestre próxima a esta última, mientras que la otra especie tetraploide, *T. timopheevi* (genoma *AAGG*), puede proceder de un cruzamiento entre *T. monococcum* y *T. speltoides* (genoma *SS*). Por otro lado, el trigo hexaploide (genoma *AABBDD*) se originó sin duda a partir de un híbrido entre *T. turgidum* (probablemente la variedad cultivada *T. turgidum dicoccum* o escaña) y *T. tauschii* (genoma *DD*).

Las pruebas arqueológicas han demostrado que la domesticación de los trigos por el hombre neolítico tuvo lugar dentro del centro geográfico de distribución de los antecesores silvestres del trigo. La parte nordeste del Creciente Fértil (específicamente el área que comprende el sudoeste del Irán, el noroeste de Irak y el sudeste de Turquía) es el centro de distribución de dos trigos diploides silvestres, *T. monococcum boeoticum* y *T. monococcum urartu*, y del trigo tetraploide silvestre *T. timopheevi araraticum*. Es en esta región, principalmente, donde también evolucionaron y se domesticaron por primera vez las variedades cultivadas de ambas especies, *T. monococcum monococcum* y *T. timopheevi timopheevi*, respectivamente. De modo semejante, la parte sudoeste del Creciente Fértil (noroeste de Israel, sudoeste de

ESPECIES CON GENOMAS HOMOLOGOS DE LOS DEL TRIGO			ESPECIES CON GENOMAS HOMEOLOGOS DE LOS DEL TRIGO	
PROGENITOR TETRAPLOIDE	DIPLOIDES DONANTES DEL GENOMA *AA* O DEL *DD*	POLIPLOIDES CON UN GENOMA HOMOLOGO	ESPECIES DE PARENTESCO PROXIMO	ESPECIES DE PARENTESCO MENOS PROXIMO

donante diploide putativo del genoma *B* del trigo común. En esta tabla no se han incluido otras especies que guardan un parentesco más lejano con los trigos cultivados, tales como el centeno (*Secale cereale*), que también puede cruzarse con éxito con el trigo tetraploide *Triticum turgidum* para dar origen a una planta cultivada, el triticale, creada artificialmente por el hombre. (La ilustración es de Ilil Arbel.)

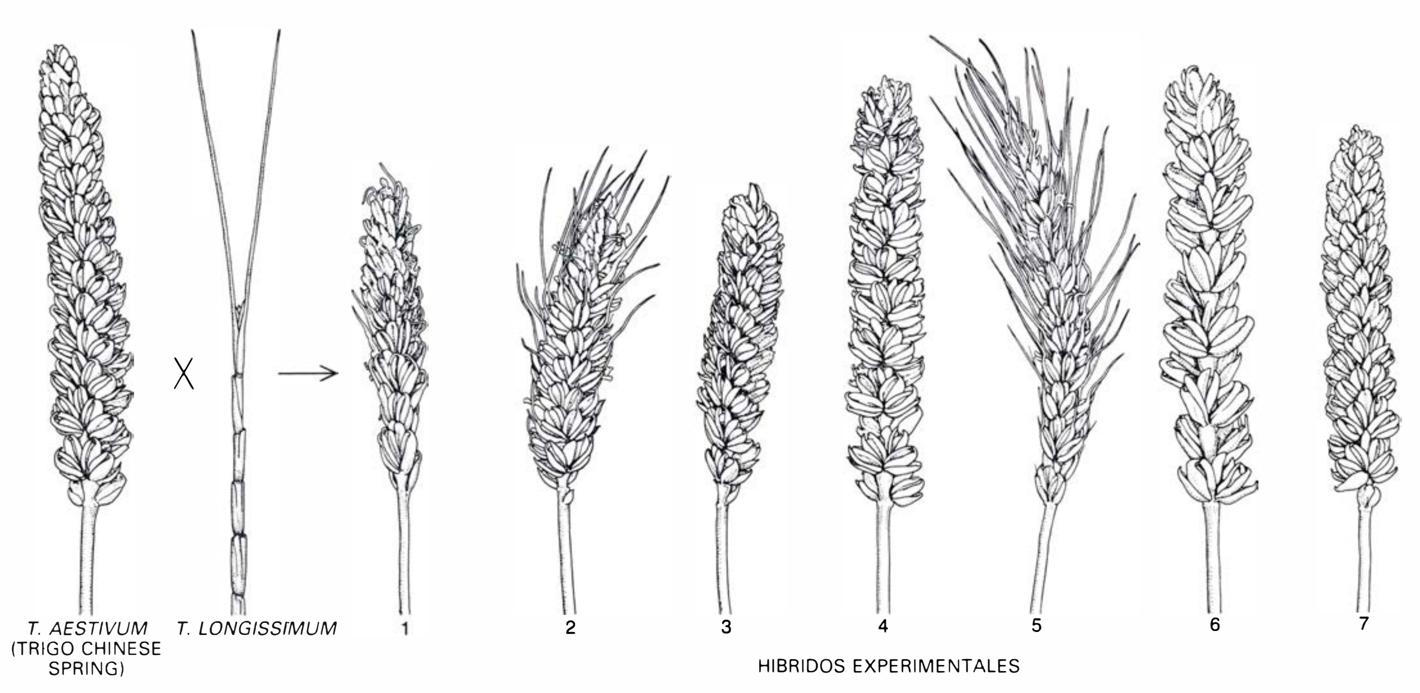


ALGUNAS ESPECIES SILVESTRES próximas al trigo, de las que se sabe que pueden cruzarse con el trigo tetraploide o con el hexaploide, y cuyo acervo genético podría, por tanto, explotarse. Bajo el nombre científico figura, para cada especie, su número cromosómico gamético; las células somáticas tienen, en cada caso, doble número cromosómico que el gamético. Nótese que todos los números cromosómicos son múltiplos del juego haploide de siete.

Siria y sudeste del Líbano) es el centro de distribución del trigo tetraploide silvestre *T. turgidum dicoccoides* y también el área donde se originaron las variedades cultivadas primitivas de esta espcie, *T. turgidum dicoccum.* Una hibridación espontánea entre *T. turgidum dicoccum* y *T. tauschii,* los dos parenterales del trigo hexaploide *T. aestivum,* debió ocurrir en tierras del oeste del Irán hace más de 8000 años, que fue cuando el trigo cultivado se introdujo en el área del silvestre.

La existencia de una amplia reserva de genes útiles en las especies silvestres próximas al trigo se hace evidente por la adaptación a ambientes muy diferentes que muestran las diversas formas silvestres. Pueden encontrarse en un amplio intervalo de regiones climáticas, desde montañas frías y húmedas hasta valles calurosos y secos, desde áreas con una precipitación anual de 1000 o más milímetros hasta regiones áridas con sólo 100 milímetros. Los trigos silvestres pueden también crecer en muchos tipos diferentes de suelos, a veces, incluso, en suelos salinos.

La rebusca de las características agronómicas útiles entre estos recursos genéticos silvestres sólo está en sus estados iniciales, y no se conoce completamente todavía la amplitud total de este tesoro genético. Está claro, con la información reunida hasta ahora, que las formas silvestres próximas al trigo cultivado mantienen ricos acervos de variación genética y son portadoras de muchos genes de gran potencial econó-



SIETE LINEAS HIBRIDAS DE TRIGO, que derivan de cruzamientos entre una variedad de la especie hexaploide de trigo *T. aestivum*, la Chinese spring, y la especie diploide silvestre *T. longuissimum*. [Comenzando a partir de la flecha.] Cada nueva variedad lleva un par diferente de cromosomas de *T. longissimum* además de los 21 del complemento cromosómico de la especie cultivada. Se introducen así caracteres silvestres en el trigo doméstico.

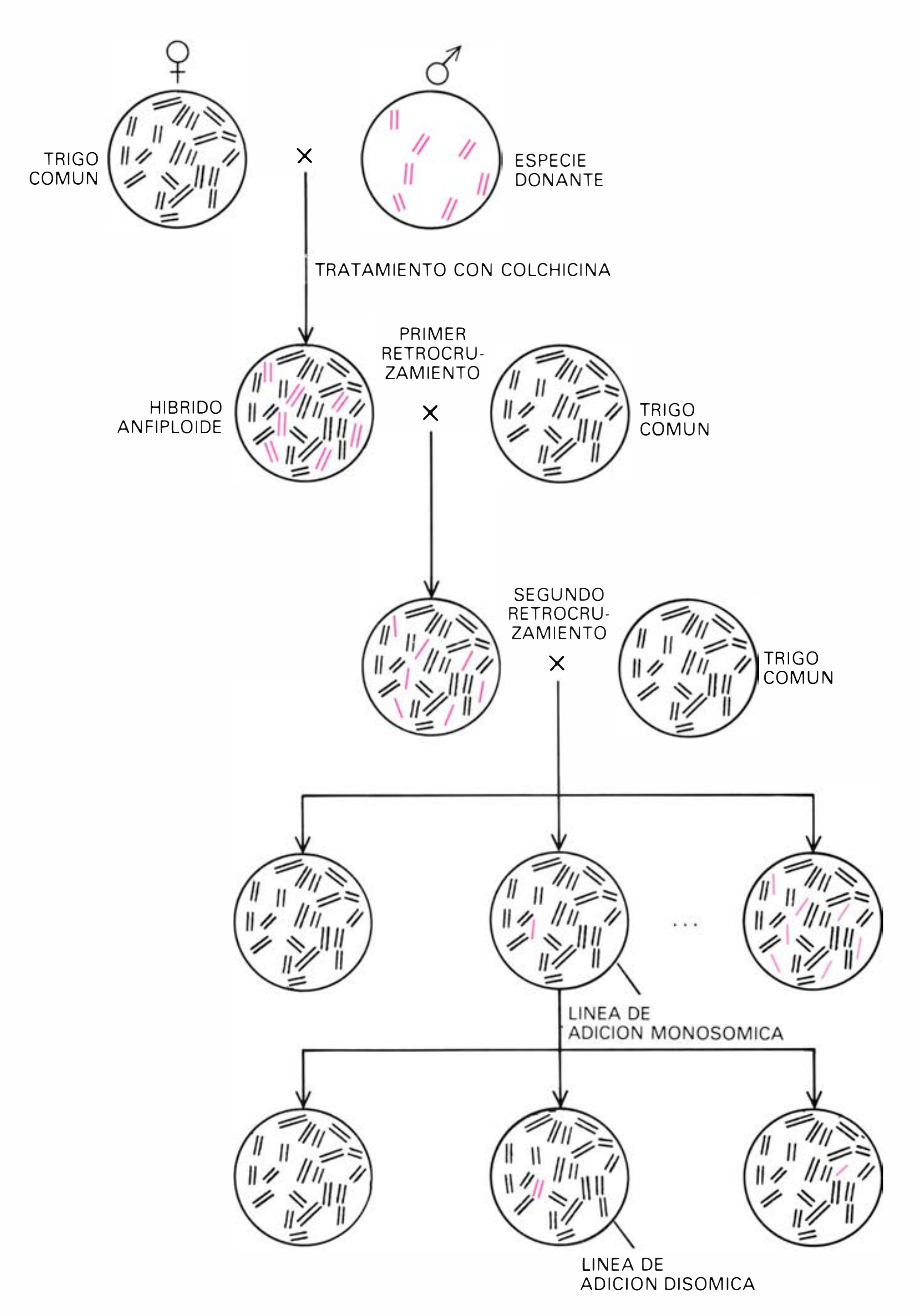
mico. Entre las características deseables que pueden encontrarse en las formas silvestres se cuentan una mejor calidad y mayor cantidad de proteína en el grano, mayor resistencia a micosis y virosis, a insectos, a la sequía y al encamado (tumbado de la mies por el viento o la lluvia), mayor resistencia al frío invernal, tolerancia al calor y a la salinidad y maduración más precoz. Las formas silvestres próximas al trigo pueden ser capaces también de conferirle directamente mayor rendimiento.

La utilización de recursos genéticos silvestres para la mejora de los trigos cultivados requiere el desarrollo de métodos apropiados para el triado y la evaluación del material genético silvestre. También se han de poner a punto métodos para facilitar la transferencia selectiva de los elementos cromosómicos deseables desde las especies silvestres hasta las cultivadas.

El primer paso para la utilización de los genes de las formas silvestres próximas al trigo debe ser el triado de colecciones de plantas individuales en razón de los caracteres de importancia agronómica. En tal triado se evalúa el potencial genético de diferentes colecciones y se seleccionan los genotipos prometedores. Es necesario un examen de las interacciones genéticas de genes individuales o de bloques génicos en los genotipos silvestres seleccionados y los trigos cultivados. Diversos análisis de tales interacciones han demostrado que, cuando los genes de las formas silvestres se separan del resto del genoma silvestre y se introducen en el genoma cultivado, pueden tener efectos no predecibles a partir de la observación de los caracteres visibles –el fenotipo– del progenitor silvestre.

Existen varias formas silvestres relacionadas con el trigo cuyos cromosomas (o algunos de ellos) son homólogos de algunos de los del trigo común, por lo que se aparean con facilidad con ellos. Los genes localizados en estos cromosomas pueden transferirse al trigo común sin gran dificultad. No obstante, la mayoría de las formas silvestres tienen cromosomas lo suficientemente diferentes de los del trigo como para que el apareamiento con éstos sea escaso, o nulo. Por tanto, se hacen necesarias técnicas especiales para introducir en los trigos cultivados material genético deseable de estas formas silvestres.

La adición de un genoma completo de una especie silvestre (dicho de otro modo, la producción de un anfiploide sintético) ha sido un procedimiento atractivo para muchos genetistas del trigo. Erich Tschermak von Seysenegg y Hubert Bleier, trabajando en 1927 en Viena, fueron los primeros en obtener una especie anfiploide como resultado de la duplicación espontánea del número cromosómico de un híbrido de trigo, que en su caso fue el resultante del cruzamiento entre *T. turgidum dicoccoides* y la gramínea silvestre *T. ovatum*, con lo que demostraron la posibilidad de formación de especies por anfiploidía dentro del grupo de los trigos. El descubrimiento, en 1937, de que la duplicación cromosómica en las plantas híbridas podía inducirse por su tratamiento con el alcaloide colchicina abrió nuevas posibilidades para la obtención de anfiploides sintéticos. Desde entonces, la producción y utilización de anfiploides sintéticos en la subtribu Triticinae ha sido mayor que en cualquier otro grupo de plantas superiores, ha-



POR LINEA DE ADICION EXTRACROMOSOMICA se entiende un tipo de híbrido de trigo en el que, al complemento cromosómico completo del trigo cultivado, se añade un par de cromosomas de determinada especie silvestre parental. En este esquema del proceso de creación de una línea de adición, el parental cultivado es hexaploide, o sea, tiene 21 pares de cromosomas (*segmentos negros*). La línea donante es diploide; tiene siete pares de cromosomas (*segmentos en color*). También pueden utilizarse especies silvestres de 14 o de 21 pares de cromosomas. El proceso comienza con la obtención de un híbrido anfiploide viable entre la especie silvestre y el trigo cultivado. (Los híbridos interespecíficos de este tipo tienen un juego de pares de cromosomas derivado de cada especie parental.) Los retrocruzamientos reiterados con la especie cultivada producen una serie de líneas de adición monosómica, híbridos en los que el cromosoma o los cromosomas extra están como univalentes (sin pareja). El cromosoma extra de cualquier línea de adición puede recuperarse en dosis doble tras autofecundación, para obtener una línea de adición disómica fértil en la que el cromosoma o los cromosomas extra están como bivalentes.

biéndose sintetizado muchos anfiploides a partir de diversos cruzamientos interespecíficos e intergenéricos. Los anfiploides suelen ser completamente fértiles, en contraste con los híbridos no duplicados, que tienden a ser estériles, especialmente androstériles.

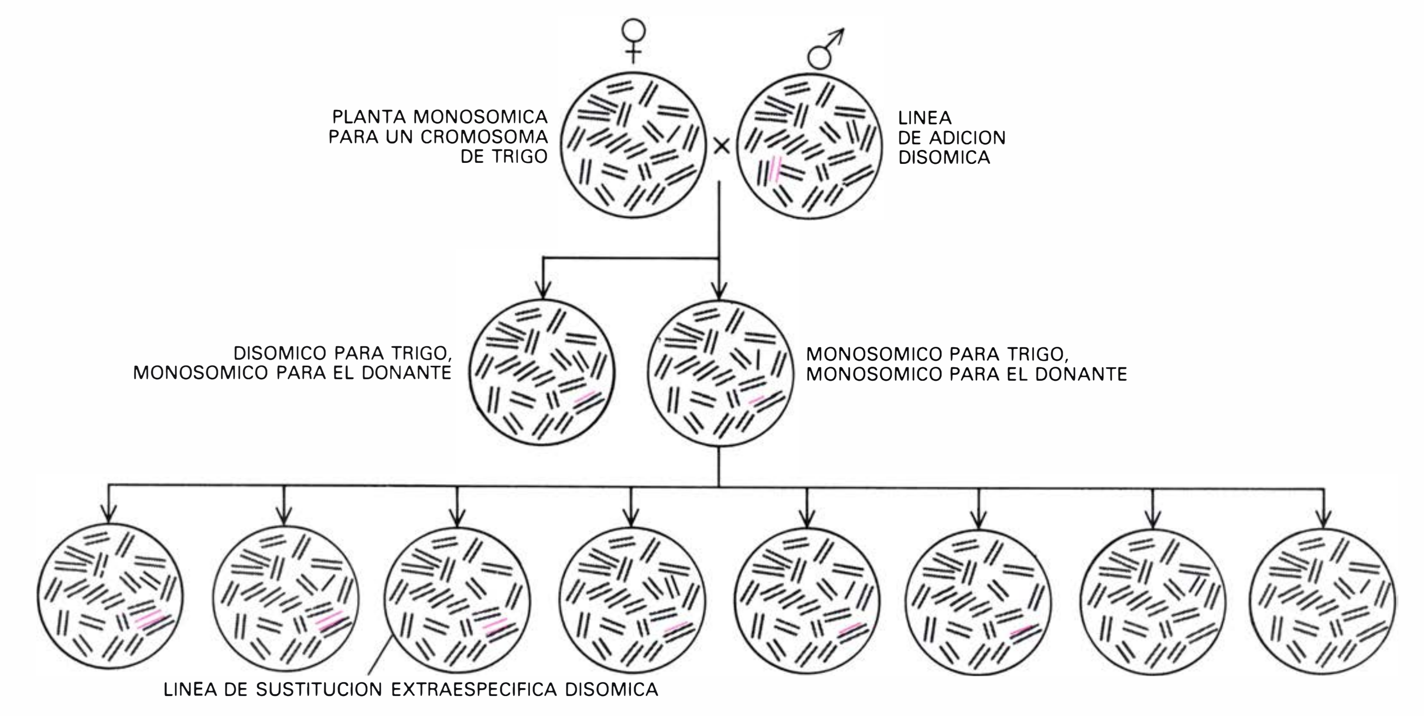
La producción de esos anfiploides, en los que se estabiliza por poliploidía la combinación híbrida adaptativa y en los que se evita la segregación de caracteres parentales, ofrece muchas posibilidades para la producción de nuevas plantas cultivadas. Sin embargo, los octoploides sintéticos que se han creado cruzando el *T. aestivum* hexaploide (principalmente el trigo común) y diversas especies diploides han sido todos inferiores al trigo común. Es posible que los niveles de ploidía superiores a seis sean menos favorables que el tetraploide y el hexaploide.

Un buen ejemplo de un anfiploide sintético de nivel hexaploide que ha dado resultados satisfactorios es la nueva planta cultivada llamada triticale. Este anfiploide deriva del cruzamiento entre el trigo tetraploide, *T. turgidum*, y el centeno común, *Secale cereale*. La combinación híbrida puede llegar a reunir la resistencia al frío invernal del centeno con algunas de las propiedades agronómicas útiles del trigo. En algunas regiones, el triticale ha demostrado una capacidad productiva superior a la de las mejores variedades comerciales de trigo. Desde el punto de vista cualitativo, el triticale se caracteriza por un grano cuyo contenido en proteína y aminoácidos esenciales es superior al del trigo. Las hibridaciones entre triticale (genoma *AABBRR*) y trigo hexaploide (genoma *AABBDD*) han dado como resultado la creación de diferentes tipos de anfiploides mixtos, de plantas en las que uno o más cromosomas del genoma del centeno han sido reemplazados por cromosomas del genoma *DD* del trigo. Algunas variedades de estos anfiploides mixtos exceden en producción, calidad y adaptabilidad a sus dos parentales.

Es posible que la hibridación del trigo tetraploide con diploides próximos procedentes de regiones semiáridas o áridas dé como resultado nuevas plantas cultivables que puedan superar a los trigos cultivados en resistencia a la sequía, tolerancia a la salinidad o tolerancia al calor. Estas nuevas plantas podrían ser los mismos anfiploides primarios o bien formas derivadas del cruzamiento de éstos con el trigo común. Los anfiploides sintéticos pueden servir también de puente eficaz para atravesar las barreras que en los cruzamientos interespecíficos o intergenéricos impiden la transferencia de genes desde las especies diploides silvestres hasta los trigos cultivados. Finalmente, se utilizan en la creación de líneas de adición y sustitución extraespecífica, que son otras dos importantes armas en las manos del genetista triguero.

El genoma de una especie silvestre de trigo puede contener, además de genes deseables, muchos genes desfavorables con efectos deletéreos. Por si fuera poco, los genes desfavorables pueden suprimir cualquier ventaja que tenga un anfiploide sintético con respecto a su parental cultivado. Este material desfavorable sólo podría eliminarse, aceptado que se pueda, después de muchas generaciones de retrocruzamiento con la especie cultivada. Es muy ventajosa, por tanto, la transferencia del gen o genes extraespecíficos útiles del genoma donante acompañados de la menor cantidad posible de material cromosómico adicional. En la práctica, lo deseable es transferir sólo un cromosoma o incluso sólo un segmento de un cromosoma.

Dado que las diferentes especies diploides de la subtribu Triticinae derivan de un antepasado común, sus cromosomas, aunque se han diferenciado considerablemente unos de otros, todavía conservan cierto grado de similaridad. Tales cromosomas se llaman homeólogos (de la raíz griega *homoios,* que significa similar) en vez de homólogos (de la raíz griega *homos,* que significa igual). Siendo siete el número cromosómico básico en este grupo, los cromosomas de cada genoma de las



LLAMAMOS LINEA DE SUSTITUCION a aquella en la que un par de cromosomas de otra especie sustituye a una pareja homeóloga de cromosomas del trigo cultivado. El proceso comienza con el cruzamiento de una planta de una línea de adición con una planta monosómica de trigo común (es decir, una planta en la que un cromosoma dado, el que se representa en negro, está presente sólo con una copia y no con las dos copias normales). La descendencia de primera generación que sea monosómica doble (plantas con el cromosoma extra y con un cromosoma del trigo en dosis monosómica) se autofecunda; en su descendencia hallaremos plantas disómicas para el cromosoma de la especie silvestre y deficientes para el cromosoma homeólogo del trigo. Cada planta tiene 20 pares de cromosomas del trigo (*segmentos grises*) que no intervienen en las hibridaciones. Los gametos masculinos que sólo llevan 20 cromosomas y derivan de plantas seleccionadas en la primera generación no se muestran aquí; difícilmente soportarían la competencia de los demás.

Triticinae se clasifican en siete grupos homeológicos distintos; cada genoma contiene un par de cromosomas de cada grupo homeológico. Por ejemplo, los cromosomas del trigo hexaploide pueden clasificarse en siete grupos homeólogos de tres pares cada uno, lo que refleja el origen del trigo a partir de tres diploides emparentados, con siete pares de cromosomas cada uno. Al tener los genes loci similares en los cromosomas homeólogos, puede un cromosoma de cualquier genoma de las Triticinae sustituir a su homeólogo virtualmente en cualquier otro genoma de las Triticinae, compensando, al menos en parte, la ausencia del homeólogo.

Un método apropiado para transferir material genético de las formas silvestres a los trigos cultivados es el de producir una serie de líneas de adición extraespecífica, cada una de ellas con el complemento cromosómico completo de un trigo cultivado y un par de cromosomas de una forma silvestre próxima. La producción de líneas de adición extraespecífica requiere de la obtención de un híbrido viable entre la especie silvestre y el trigo cultivado; el resto del proceso cuenta con un éxito casi seguro, aunque la tarea lleva su tiempo [*véase la ilustración de la página 57*].

Este procedimiento es el que se ha seguido para añadir al complemento del trigo hexaploide cromosomas individuales de varias especies de *Triticum*, *Agropyrum* y *Secale*, y al complemento del trigo tetraploide cromosomas individuales de *Secale cereale*, *Agropyrum elongatum*, *T. umbellulatum* y del genoma *DD* del trigo común. Cuando resultan difíciles o imposibles los cruzamientos directos entre el trigo hexaploide y una especie diploide silvestre, el trigo tetraploide puede servir de especie puente. Este método se ha utilizado, por ejemplo, para transferir al trigo cromosomas individuales de *Haynaldia villosa* y de *T. umbellulatum*.

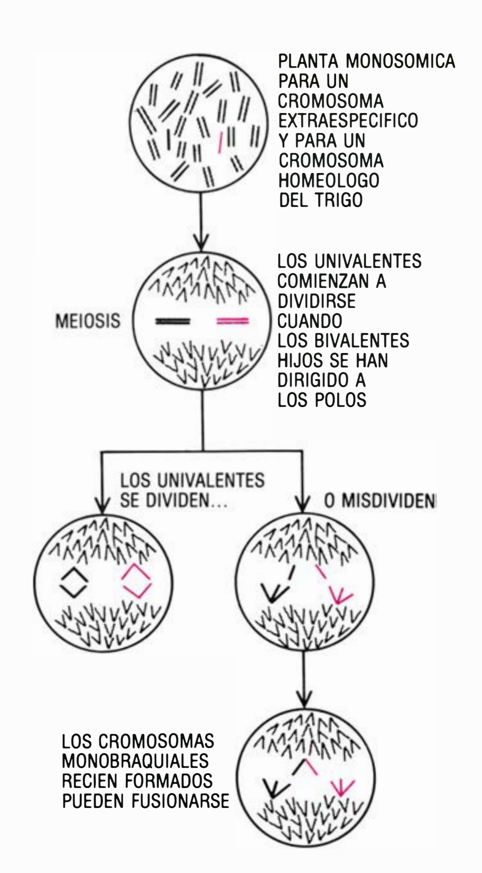
Las líneas de adición se utilizan, a su vez, para la creación de líneas de sustitución extraespecífica; en cada una de las cuales un par de cromosomas de otra especie reemplaza a su par de homeólogos del trigo [*véase la ilustración de la página anterior*]. Dado que cada cromosoma sustituyente tiene un homeólogo en cada uno de los tres genomas del trigo común, existen tres líneas de reemplazamiento diferentes para cada cromosoma sustituyente. Cuando no se conoce cuáles son los homeólogos de un cromosoma sustituyente determinado, suele cruzarse la línea de adición con las siete líneas monosómicas (que contienen una sola copia de un cromosoma determinado en lugar de dos) de un genoma del hexaploide. La descendencia de primera generación que sea monosómica doble (plantas portadoras de un cromosoma extraespecífico y de un cromosoma del trigo) se deja autofecundar y en su descendencia se obtienen plantas disómicas para el cromosoma silvestre y deficientes para el cromosoma del trigo. Estas plantas con sustituciones, a menos que el cromosoma del trigo que falta sea homeólogo del sustituyente, aparecerán con escasa frecuencia y tendrán poco vigor y baja fertilidad. Cuando se ha obtenido la sustitución para un cromosoma del trigo, la sustitución de sus homeólogos en los otros dos genomas puede intentarse con gran probabilidad de éxito.

Una vez obtenidas líneas de adición o de sustitución, se las puede mantener y multiplicar; ello permite su remisión posterior a laboratorios y estaciones de mejora para su ensayo en diferentes condiciones. Se trata de líneas completamente fértiles en muchos casos, que rinden cantidades suficientes para su utilización en análisis de campo en gran escala. Las líneas de sustitución son más estables que las de adición, en las que el cromosoma extra tiende a perderse.

Rara vez resultan adecuadas para un uso práctico inmediato las líneas de adición o sustitución extraespecífica, aunque hay una notable excepción: algunas variedades comerciales de trigos europeos tienen un par de cromosomas del trigo sustituido por un par de cromosomas de centeno. La utilización principal de las líneas de adición y sustitución extraespecífica es como material de partida para realizar transferencias que afecten a menos de un cromosoma completo.

La transferencia de un solo brazo de un cromosoma, y no del cromosoma entero, reduce todavía más el peligro de introducción de genes desfavorables acompañando al gen deseado. Estas transferencias se hacen posibles gracias a la fuerte tendencia de los cromosomas univalentes (no apareados) del trigo a sufrir una misdivisión, o fisión céntrica, en la meiosis, dando origen a cromosomas de un solo brazo, que pueden unirse con otros semejantes formados de idéntica manera. De este modo, a partir de una planta monosómica para un cromosoma extra y para uno de sus homeólogos del trigo puede obtenerse la sustitución de un brazo del cromosoma del trigo por el brazo correspondiente del cromosoma extra [*véase la ilustración de esta misma página*]. Con todo, el brazo extra completo puede llevar todavía genes desfavorables junto al deseado. Esta posibilidad, unida al hecho de que este tipo de sustitución rara vez es más fácil de obtener que la de un fragmento de brazo, hace de la sustitución de brazos completos un procedimiento al que sólo deberemos recurrir cuando fallen los intentos de transferencias más ventajosas (es decir, de porciones más cortas).

La mayoría de los cromosomas extra que normalmente no se aparean con sus homeólogos del trigo pueden ser inducidos a hacerlo alterando el ambiente genético. Hay un cierto número de genes en el trigo que facilitan el apareamiento cromosómico y otros que lo inhiben. Un gen determinado, el "apareamiento de homeólogos", o gen *Ph*, localizado en el brazo largo del cromosoma 5B, tiene un efecto más decisivo que cualquier otro. En su presencia, los homólogos se aparean regularmente, pero no así los homeólogos, mientras que en su ausencia los homeólogos (aunque menos frecuentemente) también se aparean. Basta eliminar el gen *Ph* o neutralizar su acción, para inducir a la mayoría de los cromosomas de las



SUSTITUCION DE UN BRAZO de un cromosoma de trigo por el brazo de un cromosoma homeólogo de una especie silvestre. Puede producirse por la misdivisión simultánea de dos cromosomas univalentes en la meiosis, tipo de división celular en la que, durante la formación de las células reproductoras, se reduce a la mitad el número de cromosomas. A la misdivisión sigue la fusión de las extremidades de aquellos cromosomas monobraquiales situados cerca el uno del otro. El tipo adecuado de misdivisión rara vez se da en una misma célula.

Triticinae a aparearse con sus homeólogos del trigo. Este apareamiento homeólogo inducido suele constituir el método elegido para la transferencia de genes desde cromosomas extra hasta los del trigo.

Por medio del apareamiento homeólogo inducido y el entrecruzamiento se han transferido al trigo común varios genes útiles procedentes de especies silvestres emparentadas. En el Plant Breeding Institute de Cambridge, Inglaterra, se ha transferido un gen de *T. comosum* que confiere resistencia a la roya amarilla. En la Unidad de Investigación Genética sobre Cereales de la Universidad de Missouri se han transferido dos genes de *Agropyrum elongatum* que confieren resistencia a la roya parda y un gen de *T. speltoides* que confiere extraordinaria resistencia a muchas razas virulentas de roya negra.

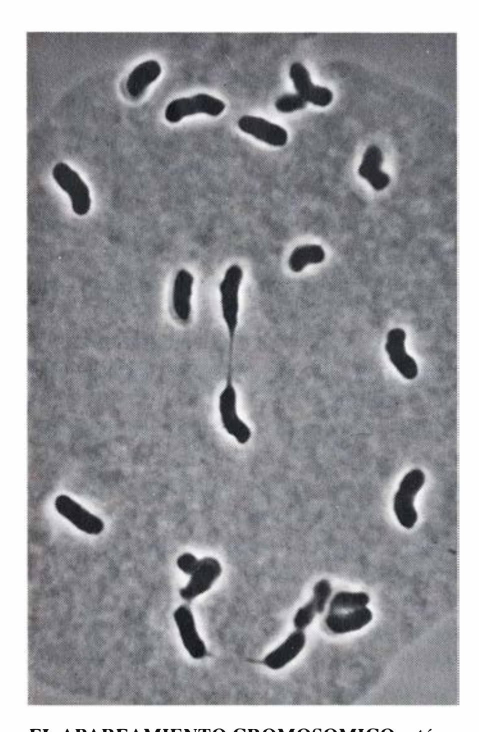
La probabilidad de éxito en la transferencia de un gen extraespecífico mediante apareamiento homeólogo inducido depende del cromosoma extra de que se trate. No basta con que el cromosoma sea capaz de aparearse homeólogamente con uno o más cromosomas del trigo, sino que, generalmente, debe aparearse en la región o regiones adecuadas. Algunos cromosomas extra, como los de la mayoría de las especies silvestres de *Triticum*, los de *Agropyrum elongatum* y los de *A. intermedium,* pueden aparearse con bastante libertad con sus homeólogos del trigo, pero otros, como los del centeno o la cebada, tienen una capacidad de apareamiento algo dudosa. Puede darse el caso de que, después de aparearse cromosomas remotamente relacionados, se presente un entrecruzamiento desigual con sus homeólogos, que conduzca a una duplicación desfavorable o a una deficiencia de ciertos segmentos.

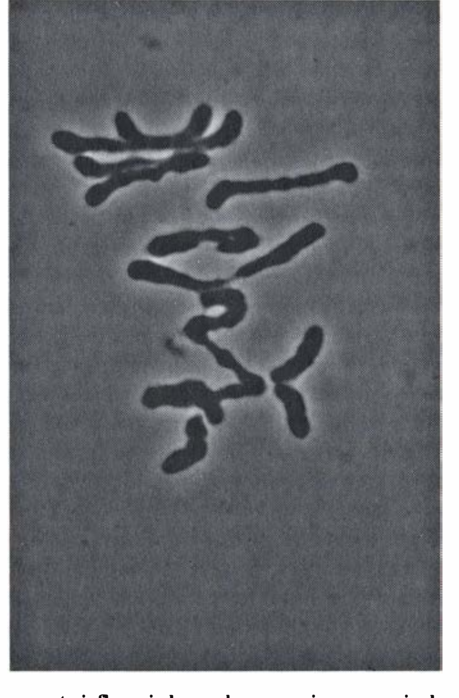
Cuando no pueda transferirse un gen extra mediante apareamiento homeólogo inducido, puede el experimentador intentar inducir la transferencia utilizando radiaciones ionizantes. Se trata de una técnica que se desarrolló y fue de amplio uso antes de que se dispusiera de métodos para la inducción del apareamiento homeólogo. El proceso es mucho más laborioso, porque el segmento extra que se transfiere, a menos que sea muy corto, debe reemplazar a un segmento de aproximadamente la misma longitud en un cromosoma homeólogo del trigo. Este tipo de translocaciones entre segmentos homeólogos es mucho menos frecuente que las que se dan entre no-homeólogos, aunque parece que existe cierta tendencia a que las translocaciones inducidas por radiación se den entre homeólogos. La mayoría de las translocaciones que se producen no son satisfactorias, porque acarrean la deficiencia de algunos genes importantes del trigo o la duplicación de los genes localizados en el segmento extra. Por esta razón, deben obtenerse muchas translocaciones que incluyan al gen deseado y evaluar si existe una esperanza razonable de conseguir, al menos, una translocación que no esté asociada con efectos deletéreos. A pesar de ello, se han transferido al trigo común, por medio de irradiación, genes potencialmente útiles para resistencia a enfermedades y procedentes de *T. umbellulatum, A. elongatum, A. intermedium* y *Secale cereale.*

No obstante las dificultades conocidas y previsibles de la transferencia al trigo de genes procedentes de sus formas emparentadas más alejadas, no cabe duda de que merece la pena intentar la realización de tales transferencias. Cuanto mayor sea la distancia a cubrir por la transferencia, mayor será la posibilidad de introducir en los trigos cultivados características útiles de las que carecen.

Las especies silvestres cercanas al trigo poseen también algunas características, tales como la androsterilidad, que no dependen de genes del núcleo celular, sino del citoplasma que le rodea. Tales caracteres pueden transferirse al trigo cultivado y quizá puedan utilizarse para la producción de trigo híbrido. Se han producido muchas líneas de trigo común y de trigo duro que llevan citoplasmas de otras especies, a través de cruzamientos entre una especie silvestre que hace de hembra y el trigo cultivado, seguidos de retrocruzamiento del híbrido de primera generación y de las siguientes, que siempre actúan de hembras, con la especie cultivada.

Las especies silvestres de las Triticinae muestran diferentes grados de afinidad citogenética y de parentesco filogenético con los trigos cultivados comunes y duros. Y en razón de esa afinidad y parentesco podemos clasificarlas [*véanse las ilustraciones de las páginas 54 y 55*]. En esta clasificación, las diversas especies silvestres emparentadas se dividen en dos grupos principales: aquellas cuyos genomas son homólogos con los de los trigos cultivados y aquellas otras cuyos genomas son homeólogos con los de tales trigos. El primer grupo está formado por el trigo silvestre tetraploide, los donantes diploides de los genomas *AA* y *DD* de los trigos cultivados y por los poliploides que comparten un genoma con los trigos cultivados. Puede transferirse material genético dentro de este grupo mediante apareamiento y recombinación entre cromosomas homólogos. No obstante, en la mayoría de los casos hay que so-





EL APAREAMIENTO CROMOSOMICO está enormemente influenciado por la presencia o ausencia de un solo gen (el gen *Ph*, de "apareamiento de homeólogos") localizado en el brazo largo del cromosoma 5B del trigo. En estas fotografías se revela la supresión por el gen *Ph* del apareamiento homeólogo en híbridos obtenidos del cruzamiento entre *T. turgidum durum* (trigo duro o semolero) y *Secale cereale* (centeno). Cuando está presente el gen *Ph* (*izquierda*) solamente se aparean dos cromosomas y 19 quedan sin aparear; cuando el gen *Ph* está ausente (*derecha*) se aparean 18 cromosomas y tres quedan sin aparear.

brepasar las barreras de esterilidad que surgen de las diferencias en niveles de ploidía o de la disparidad entre genomas.

El segundo grupo de especies silvestres emparentadas incluye varias que distan algo más de los trigos cultivados. Los genomas de estas especies no son homólogos, sino homeólogos de los genomas de los trigos cultivados, lo que indica que sus cromosomas se han diferenciado en mayor escala de los del trigo. Debido a esta parca semejanza, la transferencia de material genético deseable sólo puede realizarse mediante inducción de apareamiento homeólogo y entrecruzamiento o vía inducción de translocaciones. Se reconocen tres clases de especies dentro de este grupo de silvestres emparentadas: las de parentesco cercano, las de parentesco menos cercano y las remotamente emparentadas.

Resumiendo, es obvio que, en un futuro próximo, los ricos acervos génicos de las especies silvestres emparentadas con el trigo se aprovecharán con mayor intensidad para mejorar los trigos cultivados. La consecución de un empleo más eficaz y completo de estos acervos génicos precisa de mayor información sobre las relaciones taxonómicas, citogenéticas y evolutivas existentes entre las diversas especies silvestres y también entre las formas silvestres y las cultivadas, así como sobre la distribución geográfica y la especialización ecológica de las diferentes especies, sobre la estructura genética de las poblaciones naturales y sobre los mecanismos evolutivos de creación de variabilidad genética.

Además, será necesaria la recogida de cuantas muestras sea posible a través de las áreas de distribución de las diversas especies silvestres y, sobre todo, en los centros de diversidad de tales especies. Esto facilitará el estudio de la naturaleza y extensión de la variabilidad genética de cada especie, así como la evaluación a fondo del potencial económico de los diversos grupos. Debería proseguirse con renovado ahínco en la investigación de las relaciones de cruzabilidad entre los trigos cultivados y las formas silvestres emparentadas y emprenderse estudios más detallados sobre los sistemas genéticos que controlan el apareamiento y el entrecruzamiento en las Triticeae. Finalmente, deberán desarrollarse procedimientos citogenéticos simples para la producción y recuperación de transferencias beneficiosas de material genético desde los cromosomas silvestres hasta sus homeólogos del trigo cultivado.

El problema cuerpo-mente

¿Podrían sufrir las máquinas de calcular, tener esperanzas los marcianos y pensar los espíritus incorpóreos? El enfoque funcionalista de la psicología contemporánea suscita e incrementa la posibilidad lógica de que sí podrían

Jerry A. Fodor

La moderna filosofía de la ciencia se ha dedicado ampliamente a la descripción formal y sistemática de los logros alcanzados por los investigadores científicos. El filósofo no se pone a dictar cómo se ha de encauzar la investigación y qué pasos ha de seguir el razonamiento científico, sino que se aplica a enumerar los principios y prácticas que han contribuido a crear una buena ciencia. El filósofo ha dedicado la mayor parte de su atención a analizar las peculiaridades metodológicas de las ciencias físicas. Este análisis ha contribuido a clarificar la naturaleza de la confirmación, la estructura lógica de las teorías científicas y las propiedades formales de los enunciados legales, y ha arrojado luz sobre el problema de si existen de hecho entidades teóricas.

Sólo últimamente los filósofos de la ciencia se han interesado de veras por los principios metodológicos de la psicología. En las explicaciones psicológicas de la conducta abundan las referencias a la mente y a los estados, operaciones y procesos mentales. La dificultad filosófica surge a la hora de expresar en un lenguaje no ambiguo qué implican esas referencias.

Se pueden dividir las filosofías tradicionales de la mente en dos grandes grupos: las teorías dualistas y las materialistas. Para la concepción dualista, la mente no es una substancia física. Para las teorías materialistas, lo mental no es algo distinto de lo físico; es decir, todos los estados, propiedades, procesos y operaciones mentales son en principio idénticos a estados, propiedades, procesos y operaciones físicas. Algunos materialistas, conocidos como conductistas, sostienen que se puede eliminar del lenguaje de la psicología toda mención de las causas mentales y sustituirlas por otras en términos de estímulos del entorno y respuestas de conducta. Otros materialistas, los teóricos de la identidad, propugnan que hay causas mentales y que éstas se identifican con acontecimientos neurofisiológicos cerebrales.

En los últimos quince años ha surgido, a partir de la reflexión filosófica sobre los avances en inteligencia artificial, en teoría de computadoras, en lingüística, cibernética y psicología, una filosofía de la mente llamada funcionalismo, que no es ni dualista ni materialista. Todos estos campos, a los que se designa colectivamente como ciencias cognitivas, tienen en común un cierto nivel de abstracción y una cierta relación con sistemas que procesan información. El funcionalismo, que pretende ofrecer una explicación filosófica de ese nivel de abstracción, admite la posibilidad de que sistemas tan diversos como seres humanos, máquinas computadoras y espíritus incorpóreos puedan tener todos ellos estados mentales. Para la concepción funcionalista, la psicología de un sistema no depende del barro de que está hecho (células vivas, elementos metálicos o energía espiritual), sino de cómo está estructurado y organizado ese material. El funcionalismo es una noción difícil, y una manera de abordarlo es reseñar las deficiencias de las filosofías dualistas y materialistas de la mente, a las que pretende reemplazar.

El inconveniente más serio del dualismo es que no consigue ofrecer una explicación adecuada de la causalidad mental. Si la mente no es algo físico, no ocupa ningún lugar en un espacio físico. ¿Cómo, pues, puede una causa mental producir un efecto conductual que ocupa un lugar en el espacio? En otras palabras, ¿cómo puede lo no físico producir lo físico sin violar las leyes de conservación de la masa, de la energía y del momento?

Puede que el dualista conteste que el problema de cómo una substancia inmaterial puede causar acontecimientos físicos no es mucho más obscuro que el problema de cómo un acontecimiento físico puede causar otro acontecimiento físico. Sin embargo, hay una notable diferencia: se dan muchos casos claros de causalidad física, pero no hay ni uno solo claro de causalidad no física. La interacción física es algo que los filósofos, al igual que el resto de los mortales, no puede eliminar de su vida. Mas la interacción no física, por el contrario, puede que no sea más que un artificio de la elaboración espiritualista de lo mental. En nuestros días, la mayoría de los filósofos convienen en que no se ha dado ningún argumento perentorio de por qué no se podría considerar la causalidad mente-cuerpo como una especie de causalidad física.

El dualismo es, además, incompatible con las prácticas usuales en el trabajo psicológico. El psicólogo aplica repetidamente al estudio de la mente métodos experimentales de las ciencias físicas. Si los procesos mentales fueran de otra especie que los físicos, no habría ningún motivo para esperar que estos métodos fueran eficaces en el ámbito de lo mental. Para justificar sus métodos experimentales muchos psicólogos han buscado con ahínco una alternativa al dualismo.

Hacia 1920, John B. Watson, de la Universidad Johns Hopkins, hizo la propuesta radical de que la conducta no tiene causas mentales. Consideró que la conducta de un organismo está constituida por sus respuestas observables a estímulos, a los que admitió como causas de la conducta de ese organismo. Durante los treinta años siguientes, algunos psicólogos como B. F. Skinner, de la Universidad de Harvard, han desarrollado las ideas de Watson elaborando una visión del mundo, en la que el papel de la psicología consistía en catalogar las leyes que determinan las relaciones causales entre estímulos y respuestas. En esta concepción "conductista radical" desaparece el problema de explicar la naturaleza de la interac-

ción cuerpo-mente; simplemente no se da tal interacción.

Un halo de paradoja ha envuelto siempre a este conductismo radical. Para bien o para mal, la idea de una causalidad mental está profundamente arraigada en nuestro lenguaje ordinario y en nuestra forma de entendernos a nosotros mismos y a los demás. Es corriente, por ejemplo, que se atribuya una conducta a las creencias, al conocimiento y a las expectativas. Rafael llena el depósito de gasolina porque cree que el coche no marcha sin gasolina. Manuel no escribe "contínuo" sino "continuo" porque conoce la regla de no acentuar los vocablos llanos que finalizan en diptongo. Incluso cuando una respuesta de conducta está muy ligada a un estímulo ambiental no es raro que intervengan también procesos mentales. Luis lleva un paraguas porque el cielo está cubierto, pero el tiempo atmosférico es sólo una parte de la situación. Parece claro que en la secuencia causal se presentan también conexiones mentales: la observación y las expectativas. Las nubes afectan a la conducta de Luis sólo porque él las observa y porque le inducen una expectativa de lluvia.

El conductista radical no se inmuta porque acudamos a casos como éstos. Está preparado para desechar como residuo de credos obsoletos cualquier referencia a causas mentales, por más plausibles que puedan parecer. El conductista radical profetiza que, cuando los psicólogos vayan sabiendo más de las relaciones entre estímulos y respuestas, estarán cada vez más capacitados para explicar la conducta sin necesidad de postular causas mentales.

El argumento más fuerte contra el conductismo es que la psicología no ha abandonado esos derroteros; antes al contrario. A medida que la psicología ha madurado, ha ido creciendo cada vez más elaborado y refinado el entramado de los procesos y estados mentales que, a lo que parece, son necesarios para explicar las observaciones experimentales. Y, en el caso concreto de la conducta humana, las teorías psicológicas que se atienen a los principios metodológicos del conductismo radical se han mostrado considerablemente estériles, como sería de esperar si los procesos mentales postulados son reales y con influjo causal.

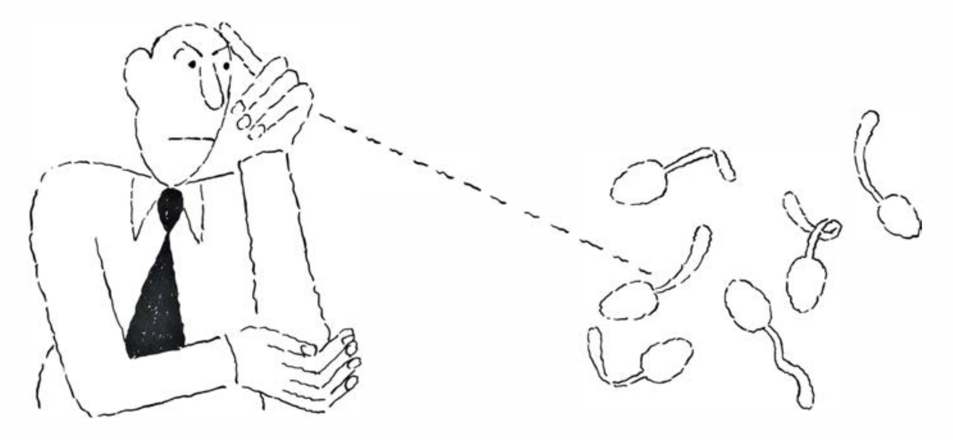
Con todo, muchos filósofos se sintieron inicialmente arrastrados al conductismo radical porque, paradojas incluidas, parecía mejor que el dualismo. Como no era aceptable una psicología comprometida con substancias inmateriales, los psicólogos se orientaron hacia el conductismo radical porque parecía ser la única alternativa que le quedaba a una filosofía materialista de la mente. Tal como ellos la vieron, la alternativa estaba entre el conductismo radical y los fantasmas.

Al comienzo de la década de los 60, los filósofos empezaron a dudar de que el dualismo y el conductismo radical agotaran los posibles enfoques de la filosofía de la mente. Puesto que ambas teorías parecían poco atractivas, la estrategia correcta consistía en desarrollar una filosofía materialista de la mente que, sin embargo, tuviera en cuenta y diera cabida a las causas mentales. Aparecieron dos filosofías con estas características, una llamada conductismo lógico y otra llamada la teoría de la identidad de los estados del sistema nervioso central.

El conductismo lógico es una teoría semántica acerca de lo significado por los términos mentales. La idea básica es que atribuir un estado mental (por ejemplo, estar sediento) a un organismo es lo mismo que decir que el organismo está dispuesto a proceder de una manera determinada (por ejemplo, a beber si hay agua disponible). En esta visión, el significado de una adscripción mental es equivalente a un enunciado si-entonces (llamado enunciado hipotético conductual) que expresa una disposición de conducta. Por ejemplo, "Andrés está sediento" se podría tomar como equivalente al enunciado disposicional "si hubiera agua disponible, entonces Andrés bebería". Un enunciado hipotético conductual no incluye, por definición, ningún término mental. El enunciado antecedente (si...) sólo habla de estímulos, y sólo de respuestas de conducta el enunciado consecuente (entonces...). Como estímulos y respuestas son acontecimientos físicos, el conductismo lógico es una especie de materialismo.

La fuerza del conductismo lógico reside en que, al traducir el lenguaje mental al lenguaje de estímulos y respuestas, ofrece una interpretación de las explicaciones psicológicas en la que se atribuyen los efectos conductuales a causas mentales. La causalidad mental no es más que la manifestación de una disposición conductual. Más exactamente, causalidad mental es lo que acontece cuando un organismo tiene una disposición conductual y es cierto el antecedente (si...) del enunciado hipotético conductual que expresa la disposición. Por ejemplo, se podría interpretar que el enunciado causal "Andrés bebió porque estaba sediento" significa "si hubiera agua disponible, entonces Andrés bebería, y había agua disponible".

Al suponer que cada adscripción mental puede ser traducida por un único enunciado hipotético conductual, he simplificado un tanto el conductismo lógico. De hecho, el conductista lógico sostiene a menudo que se requiere un conjunto abierto (quizás un conjunto infinito) de enunciados hipotéticos conductuales para traducir la disposición conductual expresada por un término mental. La adscripción mental "Andrés está sediento" podría también ser satisfecha por el enunciado hipotético "si hubiera zumo de naranja disponible, entonces Andrés bebería", y por un sinnúmero de otros enunciados hipotéticos. El conductista lógico no suele sostener que pueda enumerar de hecho en cada caso todos los enunciados hipotéticos que corresponden a una disposición conductual que expresa un término mental dado. Sólo hace hincapié en que, en principio, se puede transmitir el significado de cualquier término



POR DUALISMO SE ENTIENDE la doctrina filosófica de la mente que sostiene que la mente no es una substancia física. Divide todo lo que hay en el mundo en dos categorías: lo mental y lo físico. Al dualismo se le objeta que no explica la interacción causal de lo mental con lo físico. No aparece cómo una mente no física originaría efectos físicos sin violar las leyes de conservación de la masa, de la energía y del momento.

mental por medio de enunciados hipotéticos conductuales.

El conductista lógico, al interpretar un término mental como por ej. sediento, se ha inspirado y ha seguido el modelo de interpretación que muchos filósofos dan a las disposiciones físicas, verbigracia fragilidad. Se acepta habitualmente que la disposición física "el vidrio es frágil" viene a significar algo así como "si se golpeara el vidrio, entonces se rompería". En este sentido, el análisis que el conductista lógico hace de la causalidad mental es semejante al análisis tradicional de un tipo de causalidad física. Se admite que el enunciado causal "el vidrio se rompió porque era frágil" viene a significar algo así como "si se golpeara el vidrio, entonces se rompería, y el vidrio ha sido golpeado".

Al equiparar términos mentales con disposiciones conductuales, el conductista lógico ha situado los términos mentales al mismo nivel que las disposiciones no conductuales de las ciencias físicas. Es este un paso prometedor, ya que el análisis de las disposiciones no conductuales tiene una base filosófica relativamente sólida. Atribuir la ruptura de un vidrio a su fragilidad es una explicación que, sin duda, puede aceptar hasta el materialista más acérrimo. Al hacer ver que términos mentales y disposicionales son sinónimos, el conductista lógico ha ofrecido algo que el conductista radical no podía: una explicación materialista de la causalidad mental.

Sin embargo, la analogía entre la causalidad mental, tal como la expone el conductista lógico, y la causalidad física acaba aquí. El conductista lógico considera la manifestación de una disposición como la única forma de causalidad mental, siendo así que las ciencias físicas admiten, además, otras clases de causalidad. El tipo de causalidad, por ejemplo, en el que un acontecimiento físico causa otro acontecimiento físico, como cuando se atribuye la ruptura de un vidrio al hecho de que ha sido golpeado. De hecho, las explicaciones que implican una causalidad acontecimiento-acontecimiento son presumiblemente más básicas que las explicaciones disposicionales, puesto que la manifestación de una disposición (la ruptura de un vidrio frágil) implica siempre una causalidad acontecimiento-acontecimiento y no a la inversa. En el ámbito de lo mental muchos ejemplos de causalidad acontecimiento-acontecimiento implican que un estado mental causa a otro, y el conductista lógico no ofrece ningún análisis de este tipo de causalidad. En consecuencia, el conductista lógico se ve constreñido a admitir tácitamente el supuesto, muy poco plausible, de que la psicología precisa de una noción de causalidad menos potente que la exigida por las ciencias físicas.

En realidad, parece que la causalidad acontecimiento-acontecimiento es muy corriente en el campo de lo mental. Es típico que causas mentales den lugar a efectos conductuales por su interacción con otras causas mentales. Por ejemplo, tener dolor de cabeza origina una disposición a tomar una aspirina sólo si se desea también librarse de la jaqueca, y si se cree que la aspirina existe y que tomar aspirinas alivia los dolores de cabeza, etc. Dado que los estados mentales actúan recíprocamente generando una conducta, será necesario hallar un modelo de explicación psicológica que postule procesos mentales: secuencias causales de acontecimientos mentales. El conductismo lógico no es capaz de ofrecer tal modelo.

Estas consideraciones ponen de manifiesto un rasgo fundamental en el que conductismo lógico y conductismo radical coinciden por completo. Cierto que el conductismo lógico, a diferencia del radical, admite la existencia de estados mentales. Pero dado que el principio fundamental del conductismo lógico es que las referencias a estados mentales se pueden transportar fuera de las explicaciones psicológicas por medio de los enunciados hipotéticos conductuales, toda mención de estados y procesos mentales es en cierto sentido heurística. Los únicos hechos con los que de verdad se compromete el conductista son hechos acerca de relaciones entre estímulos y respuestas. En este sentido, el conductismo lógico no es más que conductismo radical en forma semántica. Aunque aquella teoría ofrece una elaboración de la causalidad mental, la elaboración es pickwickiana. Lo que no existe realmente no puede causar nada, y el conductista lógico, al igual que el radical, está profundamente convencido de que no existen causas mentales.

Otra teoría materialista de la mente, alternativa al conductismo lógico, es la teoría de la identidad de los estados cerebrales. Según defiende esta teoría, los acontecimientos, estados y procesos mentales se identifican con acontecimientos neurofisiológicos del cerebro, y la propiedad de estar en un de-



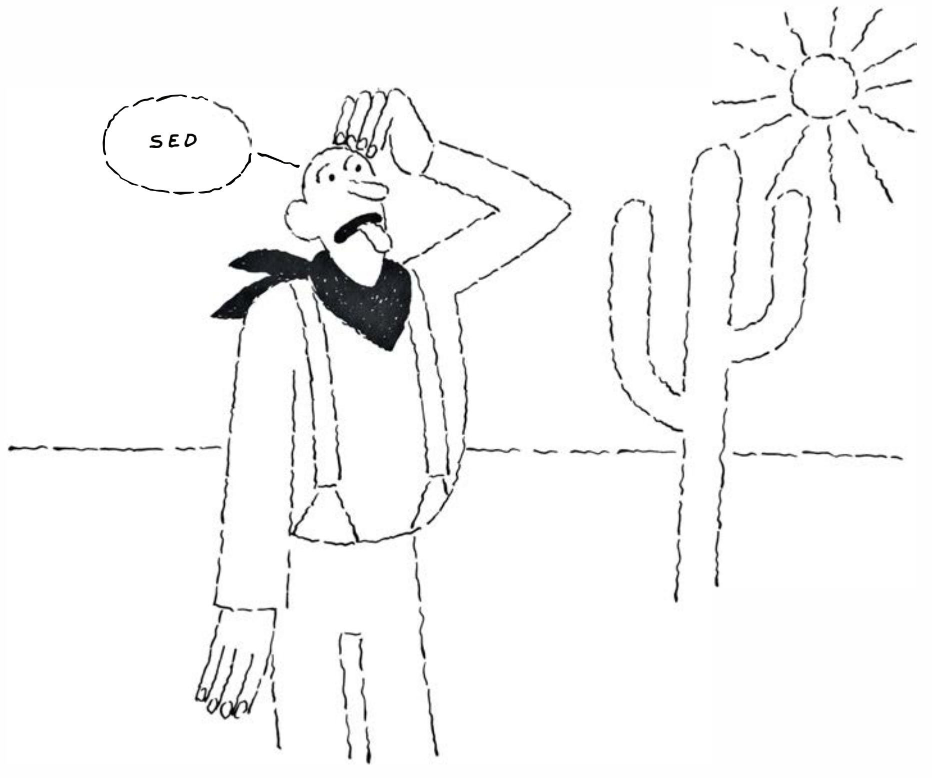
SE LLAMA CONDUCTISMO RADICAL a la filosofía de la mente que niega la existencia de la mente y de los estados, propiedades, procesos y operaciones mentales. El conductista radical cree que la conducta no tiene causas mentales. Considera que la conducta de un organismo no es otra cosa que sus respuestas a los estímulos. El papel de la psicología consiste en catalogar las relaciones entre estímulos y respuestas.

terminado estado mental (como tener dolor de cabeza o creer que va a llover) es idéntica a la propiedad de estar en un determinado estado neurofisiológico. Sobre esta base es fácil dar un sentido a la idea de que un efecto conductual pueda tener a veces una cadena de causas mentales; ello sucederá siempre que un efecto conductual dependa de la secuencia apropiada de acontecimientos neurofisiológicos.

La teoría de la identidad de los estados cerebrales admite que les es posible a las causas mentales actuar causalmente unas sobre otras sin por ello dar lugar a ningún efecto conductual, como cuando alguien, tras pensar un rato sobre lo que debe hacer, decide no hacer nada. Si los procesos mentales son neurofisiológicos, han de tener las propiedades causales de los procesos neurofisiológicos. Como los procesos neurofisiológicos son presumiblemente procesos físicos, la teoría de la identidad de los estados cerebrales (o del sistema central) asegura que el concepto de causalidad mental es tan rico como el concepto de causalidad física.

La teoría de la identidad de los estados cerebrales describe satisfactoriamente a qué se refieren los términos mentales de las explicaciones psicológicas, y por ese motivo la prefieren aquellos psicólogos a quienes no agrada el conductismo. El conductismo sostiene que los términos mentales no se refieren a nada o que se refieren a los parámetros de relaciones estímulo-respuesta. La existencia de entidades mentales es en ambos casos puramente ilusoria. Mas el teórico de la identidad defiende que los términos mentales se refieren a estados neurofisológicos. Puede, por tanto, proponerse explicar la conducta recurriendo a sus causas mentales.

La principal ventaja de la teoría de la identidad es que toma los constructos explicativos de la psicología en su sentido literal, que es algo que, sin duda, ha de hacer una filosofía de la mente, si puede. La teoría de la identidad muestra cómo las explicaciones mentalistas de la psicología podrían ser descripciones literales de la historia causal de la conducta y no sólo mera heurística. Además, dado que la teoría de la identidad no es una tesis semántica, es inmune a muchos de los argumentos que ponen en tela de juicio al conductismo lógico. Uno de los inconvenientes del conductismo lógico está en que la observación "A Manuel le duele la cabeza" no parece que signifique lo mismo que un enunciado de la forma "Manuel está dispuesto a proceder de esta y esta forma". Al teórico de la identidad, sin embargo, no le afecta que no sean sinónimos "A Manuel le duele la cabeza" y "Manuel está en tal estado cerebral". El defensor de esta teoría no afirma que estos enunciados significan lo mismo, sino sólo que los hacen verdaderos (o falsos) los mismos fenómenos neurofisiológicos.



EL CONDUCTISMO LOGICO es una tesis semántica acerca de lo significado por los términos mentales. El conductista lógico sostiene que los términos mentales expresan disposiciones conductuales. Consideremos el estado mental de estar sediento. El conductista lógico sostiene que se podría considerar que el enunciado "Andrés tiene sed" encierra un significado equivalente al enunciado disposicional "si hubiera agua disponible, entonces Andrés bebería". La fuerza del conductismo lógico está en que ofrece una explicación de la causalidad mental, a saber: la realización de una disposición conductual. Asi, por ejemplo, se podría considerar que el siguiente enunciado causal "Andrés bebió agua porque estaba sediendo" equivale a "Si hubiera agua disponible, entonces Andrés bebería, y había agua disponible".

Se puede entender la teoría de la identidad o bien como una doctrina acerca de los particulares mentales (el presente dolor de Manuel o el miedo de Ignacio a los animales) o bien como una doctrina de las propiedades o universales mentales (tener un dolor o tener miedo a los animales). Estas dos doctrinas, llamadas respectivamente fisicalismo de casos y fisicalismo de tipos, difieren en alcance y plausibilidad. El fisicalismo de casos sólo sostiene que todos los particulares mentales que de hecho existen son neurofisiológicos, mientras que el fisicalismo de tipos afirma, con más generalidad, que todos los particulares mentales que podrían existir son neurofisiológicos. El fisicalismo de casos no excluye la posibilidad lógica de que máquinas y espíritus incorpóreos puedan tener propiedades mentales. El fisicalismo de tipos desecha esta posibilidad ya que ni las máquinas ni los espíritus incorpóreos tienen neuronas.

El fisicalismo de tipos no es una doctrina plausible de las propiedades mentales, ni aún en el supuesto de que el fisicalismo de casos explicara adecuadamente los particulares mentales. La dificultad del fisicalismo de tipos es que parece que la constitución psicológica de un sistema no depende de su composición física (de su hardware), sino de su programación (de su software). ¿Por qué desecharía el filósofo la posibilidad de que los marcianos, cuyo elemento básico fuera el silicio, sufran, suponiendo que el silicio está convenientemente organizado? ¿Y por qué excluiría el filósofo la posibilidad de que unas máquinas tengan creencias, si éstas se hallan correctamente programadas? Si es lógicamente posible que marcianos y máquinas pudieran tener propiedades mentales, entonces las propiedades mentales y los procesos neurofisiológicos no podrían ser idénticos, por más que se pruebe que son coextensivos.

En conclusión, parece que hay un nivel de abstracción en el que han caído con toda naturalidad las generalizaciones de la psicología. Este nivel de abs-

tracción elimina diferencias en la composición física de los sistemas a los que se aplican generalizaciones psicológicas. En las ciencias cognitivas, al menos, el dominio natural de la teorización psicológica parece ser cualquier sistema que procesa información. El problema del fisicalismo de tipos es que hay posibles sistemas, que procesan información, con la misma constitución psicológica que los seres humanos pero con diferente composición física. En principio, cualquier clase de cosas físicamente distintas podría tener la programación (o software) humana.

Esta situación exige una explicación relacional de las propiedades mentales que prescinda de las propiedades físicas de sus portadores. A pesar de las objeciones que he presentado más arriba, el conductismo lógico estaba al menos sobre la pista correcta al ofrecer una interpretación relacional de las propiedades mentales: tener dolor de cabeza es estar dispuesto a mostrar un cierto modelo de relaciones entre los estímulos que le afectan a uno y las respuestas que manifiesta. Sin embargo, si tener dolor de cabeza es eso, entonces no hay en principio razón para que sólo puedan doler las cabezas que son físicamente semejantes a las nuestras. De hecho, para el conductismo lógico es una verdad necesaria que todo sistema que tiene nuestras posibilidades de estímulo-respuesta tiene también nuestros dolores de cabeza.

Todos estos aspectos han ido surgiendo en los últimos diez o quince años a modo de dilema embarazoso para el programa materialista de la filosofía de la mente. Por una parte ha sido el teórico de la identidad (y no el conductista lógico) quien ha captado y explicado el carácter causal de las interacciones entre mente y cuerpo. Por otra, ha sido el conductista lógico (y no el teórico de la identidad) quien ha dado cuenta del carácter relacional de las propiedades mentales. Al parecer, el funcionalismo ha sabido encontrar una solución al dilema. Al dar importancia a la distinción que la ciencia de las computadoras traza entre soporte físico y soporte lógico, el funcionalista puede dar cuenta tanto del carácter causal como del relacional de lo mental.

Subyacente al funcionalismo se halla esta intuición: lo que determina el tipo psicológico al que pertenece un particular mental es el papel (role) causal del particular en la vida mental del organismo. La diferenciación con respecto al papel causal es la individuación funcional. Se identifica, por ejemplo, un dolor de cabeza con el tipo de estado mental que, entre otras cosas, produce una disposición a tomar aspirinas en la gente que cree que la aspirina alivia el dolor de cabeza, origina un deseo de liberarse del dolor que uno está sintiendo, a veces le hace decir (a quien hable castellano) cosas tales como "me duele la cabeza"; y lo produce el exceso de trabajo, el forzar la vista y la tensión. Probablemente esta lista no es completa. Se sabrá más de la naturaleza de un dolor de cabeza a medida que la investigación psicológica y fisiológica vaya ahondando en su papel causal.

El funcionalismo construye la noción de papel causal de forma que se puede definir un estado mental por sus relaciones causales con otros estados mentales. Es este uno de los aspectos en que el funcionalismo difiere por completo del conductismo lógico. Otra diferencia importante es que el funcionalismo no es reduccionista. No prevé, ni en principio, la eliminación de los conceptos mentalistas del aparato explicativo de las teorías psicológicas.



TEORIA DE LA IDENTIDAD de los estados cerebrales: doctrina filosófica de la mente que equipara los acontecimientos, estados y procesos mentales a acontecimientos neurofisiológicos. La propiedad de estar en un estado mental dado es idéntica a la de estar en un determinado estado neurofisiológico.

La diferencia entre el funcionalismo y el conductismo lógico se hace patente por el hecho de que el funcionalismo es perfectamente compatible con el fisicalismo de casos. Al funcionalista no le perturbaría que los acontecimientos cerebrales resultaran ser las únicas cosas con las propiedades funcionales que definen los estados mentales. De hecho, la mayoría de los funcionalistas esperan que será así.

Como el funcionalismo admite que los particulares mentales puede que sean físicos, es compatible con la idea de que la causalidad mental es una especie de causalidad física. En otras palabras, el funcionalismo tolera la solución materialista del problema cuerpomente ofrecida por la teoría de la identidad de los estados cerebrales. El funcionalista está en situación de sostener tanto que las propiedades mentales están definidas típicamente en términos de sus relaciones como que las interacciones entre cuerpo y mente son típicamente causales, por más potente que sea la noción de causalidad exigida por las explicaciones psicológicas. El conductista lógico sólo puede ratificar la primera parte de la afirmación, y el fisicalista de tipos sólo la segunda. En resumen, parece que el funcionalismo toma los mejores rasgos de las alternativas materialistas al dualismo. No debe, pues, sorprendernos que el funcionalismo haya ido ganando adeptos.

En las máquinas podemos ver bien ejemplificadas dos nociones que son centrales en el funcionalismo: primera, los estados mentales están interdefinidos, o definidos recíprocamente; segunda, son muchos los sistemas que los pueden actualizar y hacer realidad. La ilustración de la página 70 contrapone dos máquinas expendedoras de cocacola: conductista una y mentalista la otra. Ambas máquinas proporcionan una coca-cola por 10 cts. (La inflación hace tiempo que no ha afectado a estos precios.) Los estados de las máquinas están definidos por referencia a sus papeles causales, pero al conductista sólo le agradará la máquina de la izquierda. Su único estado (E_0) está totalmente definido en términos de estímulos y respuestas. Una máquina está en el estado E_0 si y sólo si, introducida una moneda de 10 cts. como input, proporciona una coca-cola como output.

La máquina de la derecha tiene estados definidos recíprocamente (E_1 y E_2), característicos del funcionalismo. Una máquina está en el estado E_1 si y sólo si, (1) introducida una moneda de 5 cts., no sale nada y pasa al E_2, y (2) introducida una moneda de 10 cts. proporciona una coca-cola y permanece en el estado E_1. Una máquina está en el estado E_2 si y sólo si (1) introducida una moneda de 5 cts. proporciona una coca-cola y pasa al estado E_1, y (2) introducida una moneda de 10 cts. proporciona una coca-cola y una moneda de 5 cts. y pasa al estado E_1. Del conjunto de E_1 y E_2 resulta que la máquina proporciona una coca-cola si se le introduce una moneda de 10 cts., proporciona una coca-cola y una moneda de 5 cts. si se le introduce una moneda de 10 cts. y otra de 5 cts., y espera a que se le introduzca una segunda moneda de 5 cts. si ya se le ha introducido una de 5 cts.

Puesto que tanto E_1 como E_2 están definidos por enunciados hipotéticos, se les puede considerar disposiciones. No son, sin embargo, disposiciones conductuales, porque las consecuencias que una entrada (input) tiene para la máquina en E_1 o E_2 no están especificadas únicamente en términos de la salida (output) de la máquina. Antes bien, en las consecuencias interfieren también los estados internos de la máquina.

En la forma en que he descrito las máquinas de coca-cola conductista y mentalista, no hay nada que imponga limitaciones atribuibles a su composición material. Cualquier sistema, cuyos estados mostraran las adecuadas relaciones con las entradas, salidas y otros estados, podría ser una de esas máquinas. Sin duda, es razonable esperar que dicho sistema esté construido de ruedas, palancas y diodos (fisicalismo de casos para las máquinas de coca-cola). De igual forma, es razonable esperar que se pueda mostrar que nuestras mentes son neurofisiológicas (fisicalismo de casos para los seres humanos).

Sin embargo, la descripción del soporte lógico de una máquina de cocacola no precisa, con necesidad lógica, de ruedas, palancas y diodos para su concreta realización. Por el mismo motivo, la descripción del software de la mente no exige necesariamente neuronas. Desde un punto de vista funcionalista, una máquina de coca-cola con los estados E_1 y E_2 podría estar hecha de ectoplasma, si es que tal material existe y sus estados tienen las propiedades causales pertinentes. El funcionalismo admite la posibilidad de máquinas de coca-cola incorpóreas, de la misma manera y en el mismo grado en que admite la posibilidad de mentes incorpóreas.

Decir que E_1 y E_2 están interdefinidos y que los pueden hacer realidad diferentes tipos de estructura física (hardware) no es, por supuesto, decir que una máquina de coca-cola está dotada de mente. Aunque la definición recíproca y la especificación funcional son rasgos típicos de los estados mentales, son a todas luces insuficientes para caracterizar lo mental. Más adelante me ocuparé de esos otros rasgos.

El funcionalismo les resulta sospechoso a algunos filósofos porque parece excesivamente cómodo y poco exigente. Al permitir caracterizar la individuación de los estados por referencia a su papel causal, el funcionalismo parece aceptar una explicación trivial de cualquier acontecimiento *A* observado, es decir, parece postular un causante de *A*. Por ejemplo, ¿qué es lo que abre la válvula de una máquina? ¡Está claro! la operación de un abridor de válvulas. ¿Y qué es un abridor de válvulas? ¡Evidente! cualquier cosa que tiene la propiedad, funcionalmente definida, de hacer que las válvulas se abran.

En psicología estas peticiones de principio toman a veces la forma de teorías que en la práctica equivalen a postular unos *homúnculos* con las mismísimas capacidades intelectuales que el teórico se propone explicar. Esto sucede, por ejemplo, cuando se explica la percepción visual con sólo postular un mecanismo psicológico que procese información visual. El conductista ha acusado repetidamente al mentalista, y a veces con razón, de traficar con este tipo de pseudo-explicaciones circulares. Habrá que afrontar y contestar esta acusación si es que la definición funcional de los estados mentales ha de desempeñar un papel importante en las teorías psicológicas.

El núcleo de la acusación no es falso, sino trivial. No cabe duda de que es un abridor de válvulas lo que abre las válvulas y de que procesar información visual media la percepción visual. La objeción dice que tales supuestas explicaciones funcionales son meras perogrulladas. El funcionalista puede contestar a esta objeción admitiendo constructos teóricos definidos funcionalmente, sólo si existen mecanismos que pueden realizar la función y sólo si tiene alguna idea de las características que podrían tener tales mecanismos. Una manera de fijar estas condiciones es identificar los procesos mentales que postula la psicología con las operaciones de una clase concreta de posibles computadoras, las llamadas máquinas de estado discreto o de Turing.

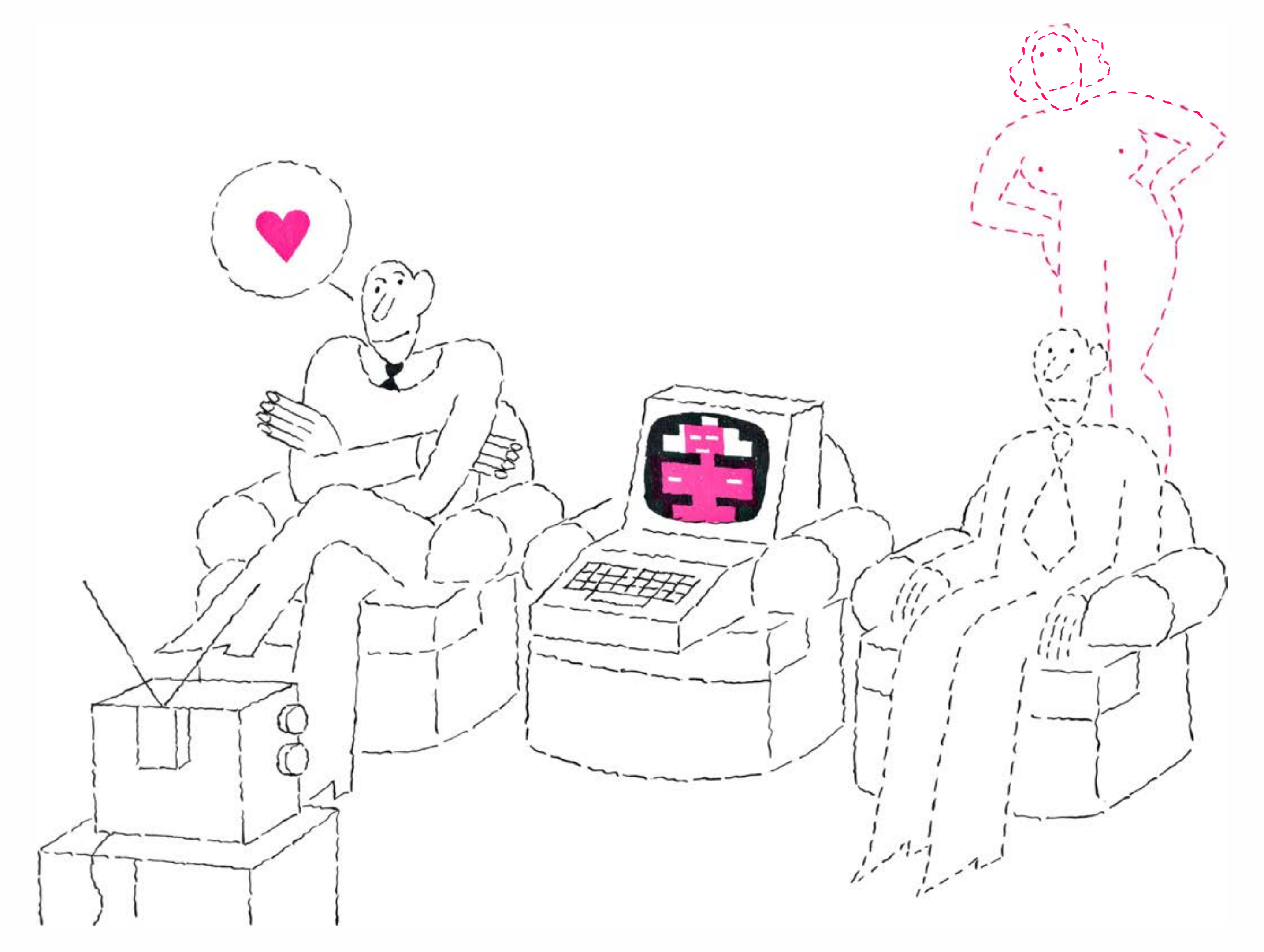
De un modo informal se puede presentar una máquina de Turing como un

mecanismo con un número finito de estados de programa. Las entradas (input) y salidas (outputs) de la máquina se graban en una cinta, que está dividida en secciones cuadradas, cada una de las cuales contiene un símbolo de un alfabeto finito. La máquina registra la cinta de cuadrado en cuadrado. Puede borrar un símbolo de un cuadrado registrado y sustituirlo por otro. La máquina sólo puede realizar las operaciones mecánicas elementales de registrar, borrar, marcar, hacer correr la cinta y cambiar de estado.

Los estados de programa de la máquina de Turing se definen únicamente en términos de las señales de entrada (input) y de salida (output) de la cinta, de las operaciones elementales y de los otros estados del programa. Por consiguiente, cada estado de programa está definido funcionalmente por la parte que desempeña en la operación global de la máquina. Como el papel funcional de un estado depende de la relación del estado a los otros estados y a las entradas (inputs) y salidas (outputs), la versión del funcionalismo que presenta la máquina de Turing recoge el carácter relacional de lo mental. Dado que la definición de un estado de programa no se refiere en ningún momento a la estructura física del sistema que ejecuta el programa, la versión del funcionalismo de la máquina de Turing recoge también la idea de que la índole de un estado mental es independiente de su realización física concreta. Un ser humano, un gentío, una computadora y un espíritu incorpóreo serían todos ellos una máquina de Turing si operaran conforme a una programación de máquina de Turing.

El objetivo es limitar la definición funcional de estado psicológico a aquellos que se pueden expresar en términos de los estados de programa de máquinas Turing. Esta restricción, si es que se puede imponer, ofrece una garantía de que las teorías psicológicas serán compatibles con las exigencias de los mecanismos. Por tratarse de artilugios muy simples, las máquinas Turing son, en principio, de construcción sencilla. Por consiguiente, el psicólogo, al formular una explicación psicológica como un programa de máquina de Turing, asegura que la explicación es mecánica, aun cuando quede indeterminada la estructura material (hardware) que realiza el mecanismo.

Hay otros muchos tipos de mecanismos computadores además de las máquinas de Turing, y, por tanto, la formulación de una teoría psicológica funcionalista en la notación de la máquina de Turing presenta sólo una condición suficiente de que la teoría es realizable mecánicamente. Con todo, la condición es interesante porque la sencilla máquina de Turing puede llevar a cabo muchas tareas complejas. Si bien las operaciones elementales de dicho artefacto son limitadas, la repetición de las operaciones permite a la máquina efectuar cualquier cálculo bien definido sobre símbolos discretos.



RECIBE EL NOMBRE DE FUNCIONALISMO la filosofía de la mente que se basa en la distinción que la ciencia de las computadoras establece entre el soporte físico (o hardware) de un sistema y su soporte lógico (o software). La psicología de un sistema, por ejemplo un ser humano, una máquina o un espíritu incorpóreo, no depende del material de que está hecho (neuronas, diodos o energía espiritual, respectivamente), sino de cómo está organizado ese material. El funcionalismo no desecha la posibilidad, por remota que sea, de que sistemas mecánicos y etéreos tengan estados y procesos mentales.

Una de las tendencias importantes en las ciencias cognitivas es la de considerar la mente fundamentalmente como un dispositivo que opera con símbolos. Si se puede definir funcionalmente un proceso mental como una operación con símbolos, entonces hay una máquina de Turing capaz de efectuar la operación y una infinidad de mecanismos que plasmen esa máquina de Turing. Allí donde el manejo de símbolos es importante, la máquina de Turing ofrece una conexión entre la explicación funcional y la explicación mecánica.

La reducción de una teoría psicológica a una programación para una máquina de Turing es una forma de exorcizar a los homúnculos. La reducción asegura que no se han postulado más operaciones que las que podría realizar un mecanismo conocido. Evidentemente, el psicólogo en activo no puede especificar de ordinario la reducción de todos y cada uno de los procesos funcionalmente individuados en cada una de las teorías que está dispuesto a tomar en consideración. En la práctica, la argumentación va en sentido contrario; si es esencial para una explicación psicológica apreciada postular una operación mental, entonces el teórico tiende a suponer que ha de haber una programación de máquina Turing que realizará esa operación.

Las "cajas negras", que son usuales en los diagramas de flujo de los psicólogos, sirven no pocas veces para indicar procesos mentales postulados para los que faltan reducciones Turing. Aun así, la posibilidad en principio de tales reducciones sirve de restricción metodológica de la teorización psicológica al determinar qué definiciones funcionales se han de admitir y a qué se asemejaría saber que se ha explicado todo lo que posiblemente podría requerir explicación.

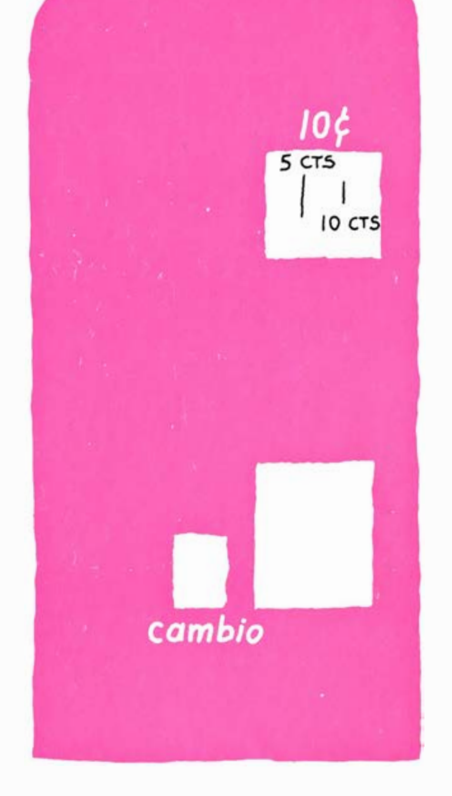
Tal es el principio, origen y futuro prometedor del funcionalismo contemporáneo. En realidad, ¿qué se ha conseguido? No es fácil contestar a esta pregunta, porque gran parte de lo que se está haciendo en la filosofía de la mente y en las ciencias cognitivas va encaminado a explorar el alcance y límites de las explicaciones funcionalistas de la conducta. Con todo, voy a dar una breve panorámica.

Es obvio que se le objete al funcionalismo como teoría de la mente que la definición funcionalista no se limita a los estados y procesos mentales. Los agentes catalíticos, las máquinas de coca-cola, los abridores de válvulas, los sacapuntas, las ratoneras y los minis-

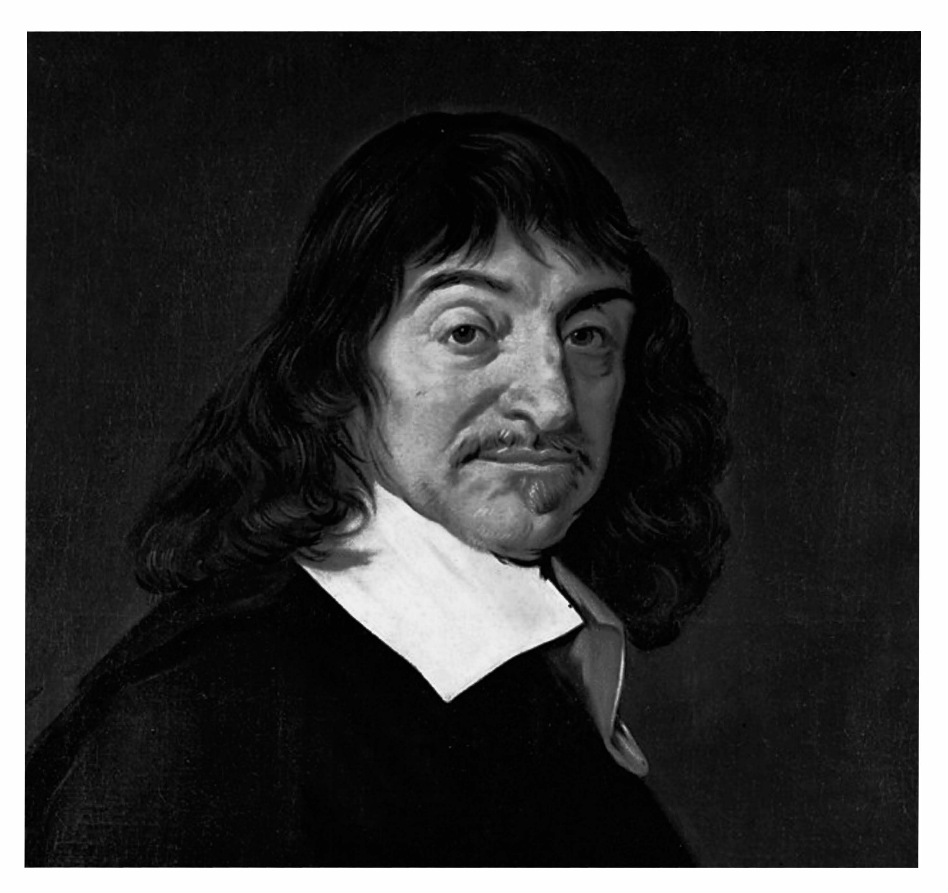
	ESTADO E_0
10 CTS INPUT	SALE UNA COCA-COLA

	ESTADO E_1	ESTADO E_2
5 CTS INPUT	NO HAY OUTPUT Y PASA A E_2	SALE UNA COCA-COLA Y PASA A E_1
10 CTS INPUT	SALE UNA COCA-COLA Y PERMANECE EN E_1	SALE UNA COCA-COLA Y 5 CTS Y PASA A E_1





DOS MAQUINAS DE COCA-COLA ponen de manifiesto la diferencia entre el conductismo (doctrina psicológica que sostiene que no hay causas mentales) y el mentalismo (teoría que defiende que las hay). Las dos máquinas proporcionan una coca-cola por 10 cts. y las dos tienen estados definidos por referencia a su papel causal. La máquina de la izquierda es conductista: su único estado (E_0) está definido únicamente en términos de entradas (input) y salidas (output). La máquina de la derecha es mentalista: sus dos estados (E_1, E_2) se han de definir no sólo en términos de entrada (input) y salida (output), sino también recíprocamente, uno en términos del otro. En otras palabras, la salida de la máquina depende no sólo de la entrada, sino también del estado de la máquina. El funcionalista sostiene que los estados mentales están interdefinidos como los estados internos de la máquina de coca-cola mentalista.



RETRATO DE DESCARTES, de Frans Hals, que se conserva en el museo del Louvre. La explicación representacional de la mente es muy anterior a la invención de la máquina computadora. Se remonta a la epistemología clásica, tradición que incluye a pensadores de direcciones tan diversas como Descartes, John Locke, David Hume, George Berkeley, Immanuel Kant, John Stuart Mill y William James.

tros de hacienda son todos ellos conceptos que, de una u otra forma, están definidos funcionalmente, pero ninguno de ellos es un concepto mental como sufrimiento, creencia y deseo. Así pues, ¿qué caracteriza a lo mental? ¿Y se puede ver reflejado en un marco funcionalista?

La concepción heredada y tradicional en filosofía de la mente sostiene que los estados mentales se distinguen por tener lo que se llama contenido cualitativo o contenido intencional. En primer lugar me ocuparé del contenido cualitativo.

No es fácil decir qué es el contenido cualitativo; es más, según algunas teorías no es ni siquiera posible decir qué es, ya que no se le puede conocer por descripción sino sólo por experiencia directa. Con todo, voy a intentar describirlo. Imaginemos que estamos mirando una pared blanca a través de un filtro rojo. Cambiemos después el filtro por otro verde, dejando todo lo demás exactamente como estaba. Algo del carácter de la experiencia cambia al hacerlo el filtro, y a ese tipo de cosas es a lo que los filósofos llaman contenido cualitativo. Me siento un tanto incómodo introduciendo los contenidos cualitativos de esta forma, pero éste es un tema en el que muchos filósofos se sienten incómodos.

No es difícil ver por qué el contenido cualitativo es un problema para el funcionalismo. El funcionalismo se obliga a definir los estados mentales en términos de sus causas y efectos. Sin embargo, parece como si dos estados mentales pudieran tener todas las relaciones causales iguales y, a pesar de ello, diferenciarse en su contenido cualitativo. Voy a ilustrar este punto con el clásico rompecabezas del espectro invertido.

Parece posible imaginar dos observadores idénticos en todos los aspectos psicológicos relevantes, excepto en que las experiencias que en un observador tienen el contenido cualitativo de rojo tienen en el otro el contenido cualitativo de verde. Esta diferencia no tiene por qué manifestarse en sus conductas, ya que los dos ven que los tomates maduros y la arrebolada puesta de sol tienen un color semejante y los dos denominan a este color "rojo". Además, podría ser también idéntica la conexión causal entre sus experiencias (cualitativamente distintas) y sus otros estados mentales. Quizá los dos piensan en Caperucita Roja cuando ven tomates maduros, se deprimen a la vista del color verde, etc. Parece como si pudieran compartir todo lo que se pudiera incluir en la noción del papel causal de sus experiencias y, con todo, el contenido cualitativo de éstas podría ser tan distinto como se quisiera. Si esto es posible, entonces la explicación funcionalista no es aplicable a los estados mentales que tienen un contenido cualitativo. Si una persona tiene una experiencia verde al tiempo que otra la tiene roja, entonces han de estar, sin duda, en estados mentales diferentes.

El ejemplo del espectro invertido resulta algo más que un juego de palabras. Se supone que poseer un contenido cualitativo es un factor importante para poder caracterizar de conscientes a los estados mentales. Muchos psicólogos que se inclinan a aceptar el enfoque funcionalista se sienten, sin embargo, decepcionados por el fracaso del funcionalismo a la hora de aclarar algo acerca de la naturaleza de la conciencia. Los funcionalistas han hecho algunos intentos agudos e ingeniosos para persuadirse a sí mismos y a sus colegas de lo infundado de esa decepción, pero, en mi opinión, con poco éxito. (Por ejemplo, quizás estemos equivocados al pensar que se puede imaginar lo que sería un espectro invertido.) Tal como están las cosas, el problema del contenido cualitativo constituye una seria amenaza a la afirmación de que el funcionalismo puede presentar una teoría general de lo mental.

Mucho mejor le ha ido al funcionalismo con el contenido intencional de los estados mentales. En este punto se sitúan los logros más importantes de las recientes ciencias cognitivas. Decir que un estado mental tiene contenido intencional es decir que tiene ciertas propiedades semánticas. Que Enrique crea, por ejemplo, que Galileo era italiano implica evidentemente una relación triple entre Enrique, una creencia y una proposición, que es el contenido de la creencia (a saber, la proposición de que Galileo era italiano). En nuestro caso, es una propiedad esencial de la creencia de Enrique el que esta creencia trate de Galileo (y no, por ejemplo, de Newton) y que es verdadera si y sólo si Galileo fue realmente italiano. Los filósofos están divididos al tratar de compaginar estos aspectos, pero suelen convenir en que las creencias implican algunas propiedades semánticas: expresar una proposición, ser verdaderas o falsas y tratar de una cosa y no de otra.

Importa entender las propiedades semánticas de las creencias, ya que en las ciencias cognitivas las teorías se ocupan

ampliamente de las creencias que tienen los organismos. Las teorías del aprendizaje y de la percepción, por ejemplo, son fundamentalmente explicaciones de cómo la variedad de opiniones que tiene un organismo están determinadas por la índole de sus experiencias y por su dotación genética. La sola explicación funcionalista de los estados mentales no ofrece por sí misma los conocimientos y elementos de comprensión requeridos. Se definen funcionalmente las ratoneras, por más que las ratoneras no expresen proposiciones y no son ni verdaderas ni falsas.

Hay al menos un tipo de cosas que no son estados mentales y que tienen contenido intencional: los símbolos. Los símbolos, como los pensamientos, parece que se ocupan de cosas. Si alguien dice "Galileo era italiano", estas palabras, al igual que la creencia de Enrique, expresan una proposición acerca de Galileo, que es verdadera o falsa según cuál fuera la patria de Galileo. Este paralelismo entre lo simbólico y lo mental subyace a los intentos tradicionales de tratar conjuntamente el lenguaje y la mente. La actual ciencia cognitiva hace lo posible por ofrecer ese tratamiento conjunto.

El concepto básico es sencillo y sorprendente. Supongamos que hay símbolos mentales (representaciones mentales) y que los símbolos mentales tienen propiedades semánticas. En esta concepción, creer algo implica relacionarse con un símbolo mental, y esta creencia recibe sus propiedades semánticas del símbolo mental con el que se relaciona. Los procesos mentales (pensar, percibir, aprender, etc.) implican interacciones causales entre estados relacionales (como, por ejemplo, creer algo). Las propiedades semánticas de las palabras y enunciados que pronunciamos proceden, a su vez, de las propiedades semánticas de los estados mentales que el lenguaje expresa.

Asociar las propiedades semánticas de los estados mentales con las de los símbolos mentales es perfectamente compatible con la metáfora de la computadora, ya que no es nada forzado concebir a la computadora como un mecanismo que maneja símbolos. Un cálculo de computadora es una cadena causal de estados de computadora, y los eslabones de la cadena son operaciones con fórmulas interpretadas semánticamente en un código de máquina. Concebir un sistema (por ejemplo, el sistema nervioso) como una computadora es preguntarse por la naturaleza del código en el que computa y por las propiedades semánticas de los símbolos del código. De hecho, la analogía entre mentes y computadoras implica en realidad postular símbolos mentales. No hay cálculo de computadora sin representación.

No obstante, la explicación representacional de la mente es muy anterior a la invención de la máquina computadora. Se remonta a la epistemología clásica, tradición que incluye a pensadores de direcciones filosóficas tan diversas como John Locke, David Hume, George Berkeley, René Descartes, Immanuel Kant, John Stuart Mill y William James.

Hume, por ejemplo, desarrolló una teoría representacional de la mente que incluía cinco puntos. Primero, existen "ideas", que son una especie de símbolos mentales. Segundo, tener una creencia implica tener una idea. Tercero, los procesos mentales son asociaciones causales de ideas. Cuarto, las ideas son como retratos. Quinto, las propiedades semánticas de las ideas se deben a la semejanza: la idea de Juan es una idea sobre Juan porque se le parece.

En nuestros días, los psicólogos del conocimiento no aceptan los detalles de la teoría de Hume, si bien refrendan mucho de su espíritu. Las teorías del cálculo de computadoras presentan una exposición mucho más rica de los procesos mentales que la mera asociación de ideas. Y son muy pocos los psicólogos que siguen creyendo que la similitud es el principal vehículo de la representación mental. Con todo, la ruptura más significativa con la teoría de Hume está en el abandono de la semejanza como explicación de las propiedades semánticas de las representaciones mentales.

Muchos filósofos, ya desde Berkeley, han hecho ver que hay algo gravemente erróneo en la indicación de que la relación semántica entre un pensamiento y aquello de que ese pensamiento trata pueda ser una relación de semejanza. Consideremos el pensamiento: Juan es alto. Es evidente que este pensamiento sólo es verdadero del estado de cosas que consiste en que Juan es alto. Una teoría de las propiedades semánticas de un pensamiento tendría, por tanto, que explicar cómo se relaciona ese pensamiento particular con este concreto estado de cosas. Según la teoría de la semejanza, tener ese pensamiento implica tener una imagen mental que muestra a Juan alto. En otras palabras, la relación entre el pensamiento 'Juan es alto' y el que lo sea es similar a la relación entre un hombre alto y su retrato.

A la teoría de la semejanza se le objeta que todo retrato que revela que Juan es alto no puede menos de revelar también que es otras muchas cosas: gordo o delgado; que está sentado, de pie, o tumbado; etc. Un retrato de un hombre alto sentado se parece a un hombre sentado tanto como a un hombre alto. En la teoría de la semejanza no queda claro qué distingue los pensamientos acerca de la altura de Juan de los pensamientos acerca de su postura.

A la teoría de la semejanza le salen paradojas a cada paso. La posibilidad de elaborar una teoría de las creencias en la que se considere que incluyen relaciones a representaciones mentales semánticamente interpretadas depende evidentemente de que tengamos una explicación aceptable del origen de las propiedades semánticas de las representaciones mentales. Si la semejanza no proporciona esta explicación, ¿qué lo hará?

Se tiende a pensar que las propiedades semánticas de una representación mental vienen determinadas por aspectos de su papel funcional. En otras palabras, se puede especificar en términos causales una condición suficiente de tener propiedades semánticas. Esta es la conexión del funcionalismo con la teoría representacional de la mente. La moderna psicología del conocimiento reposa en gran parte en la esperanza de que se logre que estas dos doctrinas se respalden una a otra.

Ningún filósofo está, por ahora, en disposición de decir con precisión cómo determina sus propiedades semánticas el papel funcional de una representación mental. Sin embargo, el funcionalista admite tres tipos de relación causal entre los estados psicológicos que incluyen representaciones mentales, y ellos nos pueden servir para fijar las propiedades semánticas de las representaciones mentales. Los tres tipos son: relaciones causales entre estados mentales y estímulos, entre estados mentales y respuestas y, por último, entre unos estados mentales y otros estados mentales.

Fijémonos en la creencia 'Juan es alto'. Probablemente los siguientes actos, que corresponden respectivamente a los tres tipos de relaciones causales, son relevantes para determinar las propiedades semánticas de la representación mental implicada en la creencia. Primero, la creencia es un efecto normal de determinadas estimulaciones, como, por ejemplo, ver a Juan en circunstancias que ponen de manifiesto su altura. Segundo, la creencia es la causa normal de determinados efectos conductuales,

tales como pronunciar "Juan es alto". Tercero, la creencia es una causa normal de otras determinadas creencias y un efecto normal de otras determinadas creencias. Por ejemplo, quien cree que Juan es alto es muy probable que también crea que alguien es alto. Por lo general, tener la primera creencia es causalmente suficiente para tener la segunda. Y quien cree que todos los que están en la habitación son altos, y cree también que Juan está en la habitación, es muy verosímil que crea que Juan es alto. Esta tercera creencia es un efecto normal de las dos primeras. En resumen, el funcionalista sostiene que la proposición expresada por una representación mental dada depende de las propiedades causales de los estados mentales en los que figura esa representación mental.

La idea de que las propiedades semánticas de las representaciones mentales están determinadas por aspectos de su papel funcional se halla en el centro del trabajo habitual en las ciencias del conocimiento. Con todo, esta idea puede no ser cierta. Muchos filósofos que no simpatizan con el giro cognitivo de la psicología moderna la ponen en duda, y probablemente muchos psicólogos la rechazarían en la forma simple y tosca en que la he esbozado aquí. No obstante, incluso en esta forma esquemática, hay que decir en su favor que legitima la noción de representación mental; noción que ha ido adquiriendo cada vez más importancia para teorizar en todas las ramas de las ciencias cognitivas. Los recientes avances en la formulación y contrastación de hipótesis acerca de la naturaleza de las representaciones mentales en campos que van desde la fonética hasta la visión de la computadora indican que el concepto de representación mental es fundamental en las teorías empíricas de la mente.

El conductista ha rechazado el recurso a la representación mental porque va contra su concepción de los mecanismos explicativos que pueden figurar en las teorías psicológicas. Sin embargo, florece en nuestros días la ciencia de la representación mental. La historia de la ciencia enseña que, cuando una teoría que tiene éxito entra en conflicto con un escrúpulo metodológico, por lo general es el escrúpulo el que cede. En esta línea, el funcionalista ha mitigado las exigencias conductistas en las explicaciones psicológicas. Quizá no haya mejor forma de establecer qué está metodológicamente permitido en una ciencia que la de investigar qué precisa una ciencia que tiene éxito.

Geles

Un gel está constituido por un fluido y una malla de polímeros. El estado queda determinado por las fuerzas que actúan en él. Basta una perturbación muy leve en estas fuerzas para provocar una transición de fase y el colapso del gel

Toyoichi Tanaka

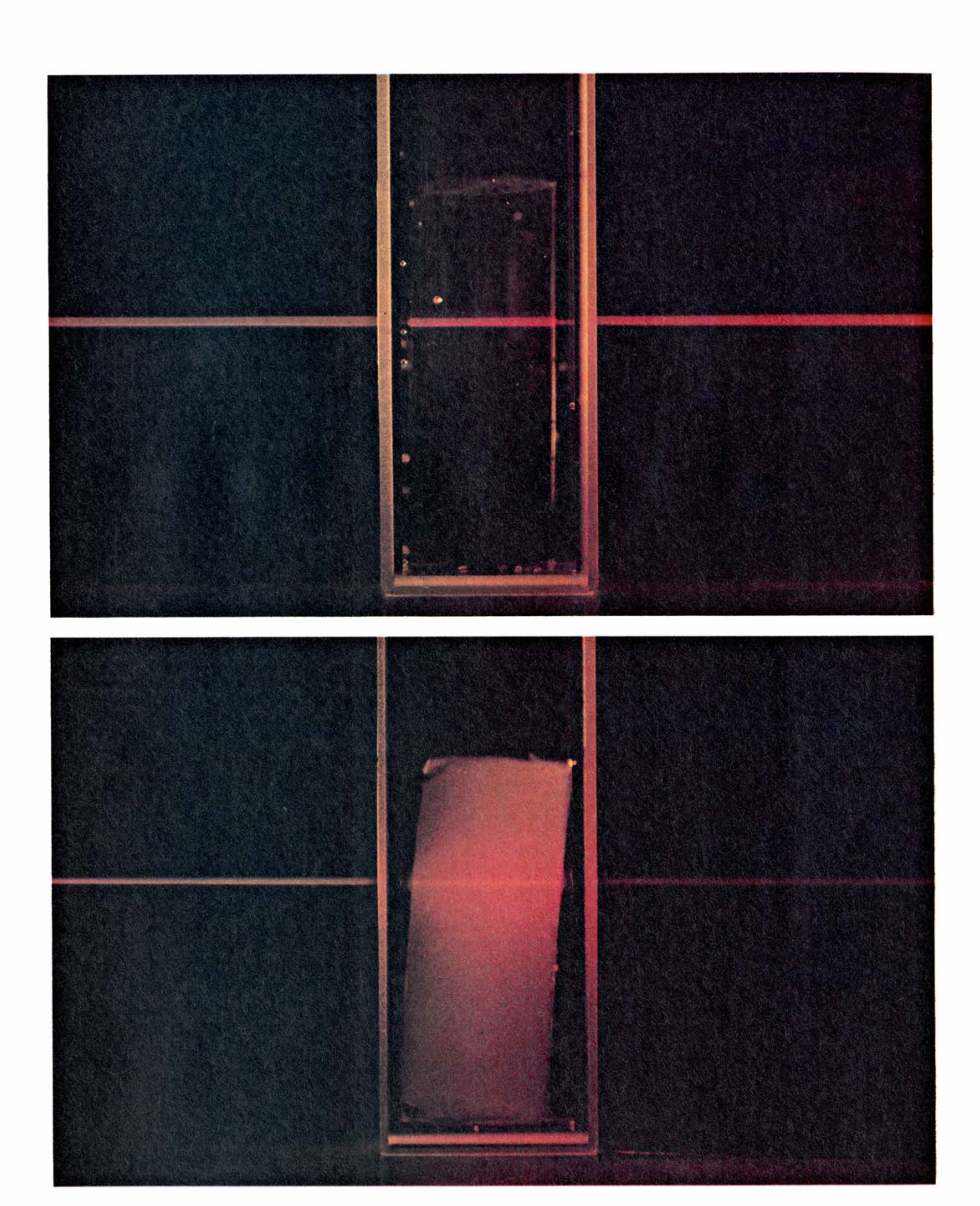
Un gel es un estado de la materia intermedio entre el estado sólido y el estado líquido. Está formado por una reticulación de polímeros, o moléculas de cadena larga, que se unen entre sí, constituyendo una red enmarañada, y por un líquido en que se encuentra inmersa esta red, que rellena los intersticios entre polímeros. Las propiedades del gel dependen estrechamente de la interacción entre estos dos componentes. El líquido impide que la red colapse en una masa compacta; la red impide que el líquido fluya libremente. Dependiendo de la composición química del líquido, entre otros factores, los geles varían en consistencia desde fluidos viscosos hasta sólidos rígidos, aunque pueden ser caracterizados como suaves y elásticos, en una palabra, gelatinosos.

Desde los años cuarenta se han venido estudiando intensamente las propiedades físico-químicas de varios geles. Las primeras contribuciones de interés se debieron a Paul J. Flory, de la Universidad de Stanford. En 1973, un grupo de investigadores, del Instituto de Tecnología de Massachusetts, comenzamos a aplicar una nueva técnica en la investigación de los geles. A partir de medidas de la dispersión de la luz de un láser por un gel, pudimos determinar algunas de las propiedades de dicho gel, tales como la elasticidad de la red y la interacción viscosa de la red con el líquido. Recientemente, con este método, hemos descubierto una nueva gama de fenómenos, anteriormente insospechados, en los geles. Mediante pequeños cambios en las condiciones externas, pueden provocarse cambios drásticos en las propiedades del gel. Por ejemplo, cuando la temperatura remite, la red disminuye su elasticidad y, en consecuencia, aumenta su compresibilidad. Cuando se alcanza un cierto valor crítico en la temperatura, se anula la elasticidad y la compresibilidad se hace infinita. A la vez, el tamaño efectivo de los poros de la red aumenta y, para la temperatura crítica, estos poros alcanzan un tamaño macroscópico. Según varía la temperatura, el gel puede dilatarse o contraerse en un factor de varios cientos de veces. Bajo determinadas condiciones, esta dilatación o contracción es discontinua; de modo que un cambio infinitesimal en la temperatura puede provocar un cambio apreciable del volumen del gel. La temperatura no es el único factor que puede dar origen a tales transformaciones; éstas pueden venir provocadas también por alteración de la composición, el pH o la intensidad iónica del solvente en que se encuentra inmerso el gel, o bien por imposición, a través del gel, de un campo eléctrico.

Actualmente, las diferentes respuestas del gel a los cambios en las condiciones externas pueden entenderse en el contexto de la teoría de las transiciones de fase y fenómenos críticos. De igual manera que muchas sustancias pueden existir en forma de líquido o vapor, según las condiciones externas, así un gel puede, a veces, tener dos fases que se distinguen por diferentes configuraciones de la red. El cambio discontinuo en el volumen y en otras propiedades del gel constituye una transición abrupta entre dos fases, análoga a la que se produce durante la ebullición de un líquido. Para mayores temperaturas (siempre que se den una serie de condiciones) las dos fases del gel no pueden distinguirse; al igual que la distinción entre líquido y vapor desaparece para temperatura y presión muy altas. El conjunto de condiciones, a partir de las cuales las dos fases del gel comienzan a ser distinguibles, constituye el punto crítico del gel, en el cual la red presenta grandes fluctuaciones de densidad y tamaño de los poros, entre otras propiedades. Los mecanismos físicos que dirigen estos cambios de estado son peculiares de la estructura de un gel y sólo pueden entenderse tras un análisis de las fuerzas que actúan sobre la red de polímeros. Ello no obstante, importa destacar que, cerca del punto crítico, puede describirse un gel mediante una formulación matemática general que parece aplicable a todos los fenómenos críticos, incluso para sistemas físicos muy diferentes entre sí.

De todos los geles, quizás el más popular sea la gelatina; en ésta, la red se halla constituida por polímeros derivados de proteínas animales. La red integra sólo el 3 por ciento del volumen total; el resto es agua con colorantes, edulcorantes y productos aromáticos. Existen otros muchos geles, naturales y artificiales. El humor acuoso que rellena el interior del ojo es un gel, así como el material de la córnea; el fluido sinovial que lubrica las articulaciones del esqueleto es otro gel. En estos geles biológicos, el componente líquido permite la libre difusión de oxígeno, nutrientes y demás moléculas, mientras que la red constituye una estructura que mantiene al líquido en su posición. Los geles son también importantes estados intermedios durante el manufacturado de polímeros tales como el caucho, plásticos, colas y membranas. En química y bioquímica, los geles se emplean en los métodos analíticos de cromatografía y electroforesis, mediante los cuales se separan las moléculas en razón de la velocidad con que percolan por los poros del gel.

En el Instituto de Tecnología de Massachusetts hemos realizado nuestros experimentos con geles cuya red está constituida por poliacrilamidas. Se inicia la preparación con dos monómeros: acrilamida, que es una molécula orgánica pequeña que termina en un grupo carbonilamida ($-CONH_2$) y bisacrilamida, que consta de dos monómeros de acrilamida unidos por sus grupos carbonilamidas. Los monómeros se disuelven en agua; luego, se añaden al conjunto otras sustancias para iniciar



LA LUZ LASER DISPERSADA sigue los cambios de la estructura microscópica de un gel de poliacrilamida. En la fotografía superior, el gel, que se encuentra a temperatura ambiente, es muy transparente, de suerte que la luz de un láser de helio-neón es en su mayor parte transmitida a través de él, siendo dispersada sólo una pequeña cantidad. En la fotografía inferior, el mismo gel ha sido enfriado hasta cero grados Celsius, donde aparece una opacidad lechosa que dispersa fuertemente la luz. Si enfriamos el gel hasta el denominado punto crítico, se originan fluctuaciones de largo alcance (gran escala) en la densidad local de la red de poliacrilamida, las fluctuaciones alteran el índice de refracción del gel y hacen que disperse la luz, fenómeno conocido como opalescencia crítica. Las mediciones de la luz dispersada informan sobre la estructura del gel, la elasticidad de la red y el tamaño de los poros en ella. Las fotografías fueron realizadas por Fritz Goro. Un gel es el estado de la materia intermedio entre el estado sólido y el estado líquido.

una reacción de polimerización en cadena. Los iniciadores son persulfato amónico y una molécula orgánica denominada tetrametil-etilen-diamina, o TEMED.

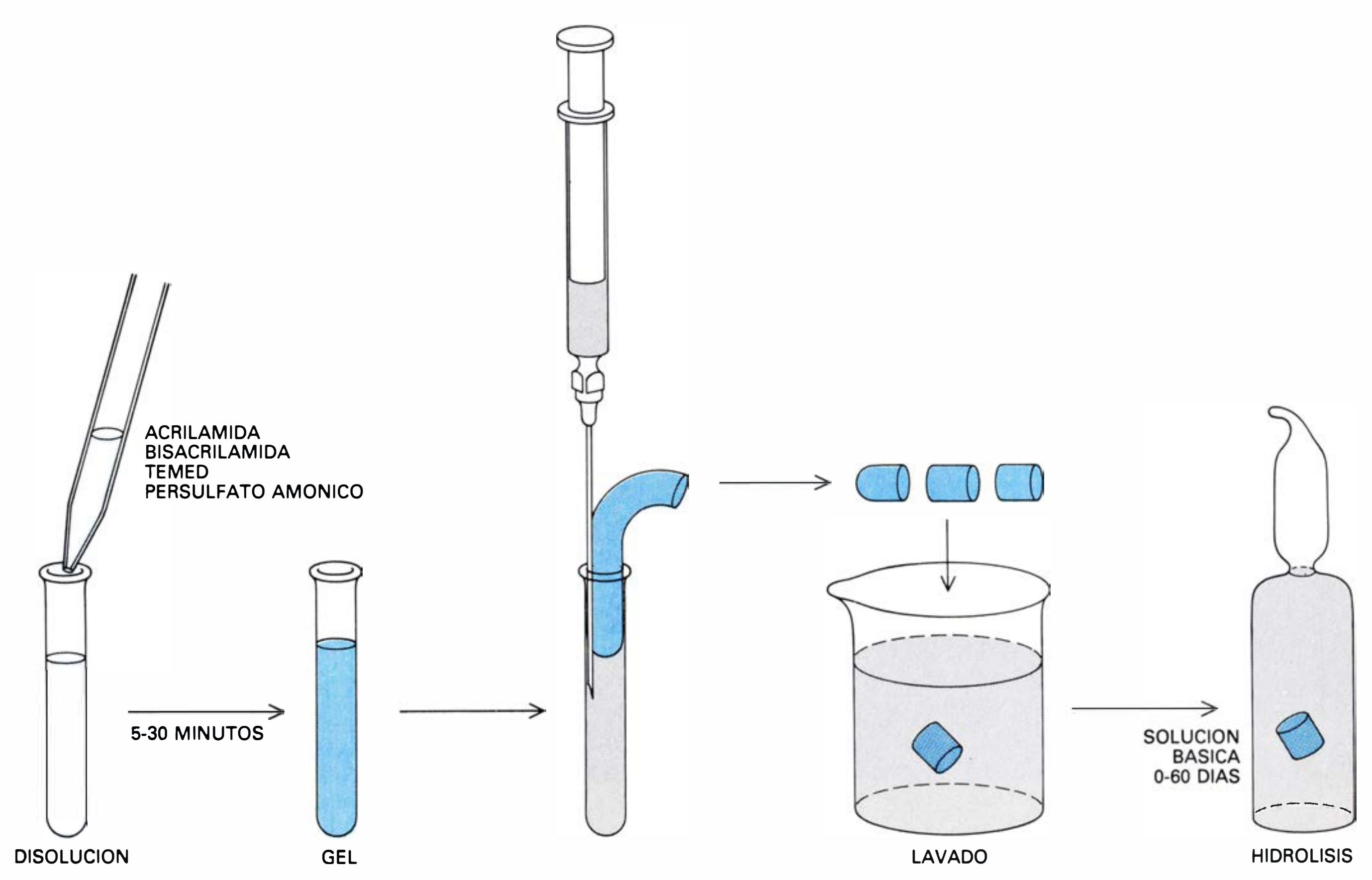
El primer paso en la polimerización es una reacción entre persulfato amónico y TEMED, en virtud de la cual la molécula de TEMED queda con un electrón de valencia sin emparejar. La molécula activada de TEMED puede combinarse con un monómero de acrilamida o de bisacrilamida; en el proceso, el electrón sin emparejar se transfiere al monómero, de modo que éste se convierte en reactivo. Por tanto, puede añadirse otro monómero al conjunto y activarse de la misma forma. El polímero puede así continuar creciendo indefinidamente (o hasta que se agoten los monómeros libres), de suerte que el centro activo está continuamente desplazándose hacia el último monómero acoplado al extremo libre de la cadena. Si la disolución incluyera sólo monómeros de acrilamida, la cadena sería siempre recta (sin ramificaciones). Pero una molécula de bisacrilamida puede incorporarse, simultáneamente, a dos cadenas, formándose de esta forma una unión permanente entre ambas. Debido a estas uniones, la poliacrilamida crece formando una complicada estructura de rizos y ramificaciones interconectadas.

La polimerización dura unos 30 minutos. Pasadas unas horas, se saca el gel del recipiente donde se ha producido la reacción y se introduce en agua para eliminar todos los monómeros e iniciadores que no hayan reaccionado. El gel es incoloro y muy transparente, dúctil y elástico, con una superficie resbaladiza o viscosa.

En una etapa final se provoca una modificación química de la red de poliacrilamida; esta etapa tiene, como veremos más adelante, una influencia decisiva sobre el tipo de transiciones de fase observadas en el gel. En el polímero original, cada dos átomos de carbono hay una cadena lateral de carbonilamida ($-CONH_2$); durante esta etapa final, algunas de estas cadenas laterales se transforman por hidrólisis en grupos carboxilos, $-COOH$. La hidrólisis es la ruptura de un grupo químico por la acción de una molécula de agua; y se provoca mediante la inmersión del gel durante un período de días o semanas en una disolución acuosa básica, de un *p*H de aproximadamente 12. El número de cadenas laterales hidrolizadas depende del tiempo de hidrólisis. Por supuesto, si no se ha hidrolizado el gel, no se habrá modificado ninguno de los grupos. La hidrólisis máxima, que se alcanza al cabo de unos 60 días de inmersión, altera cerca de una cuarta parte de las cadenas laterales.

El grupo carboxilo es la unidad funcional de un ácido orgánico. En disolución, algunos de estos grupos se ionizan espontáneamente dando lugar a iones H^+ y COO^-. En un gel de poliacrilamida altamente ionizado, la proporción de grupos carboxilos ionizados en cualquier instante es del orden de un 25 por ciento. Los hidrogeniones cargados positivamente entran en disolución en el líquido intersticial, dejando la red del polímero cargada negativamente. La interacción entre estas cargas eléctricas puede tener un efecto decisivo sobre las propiedades físicas del gel.

Valgan los siguientes ejemplos para ilustrar las transiciones de fase observadas en geles de poliacrilamida. Se prepara una tanda de geles idénticos y diversas muestras (cada una de ellas del mismo volumen, que denominaremos en lo que sigue volumen inicial) se hi-

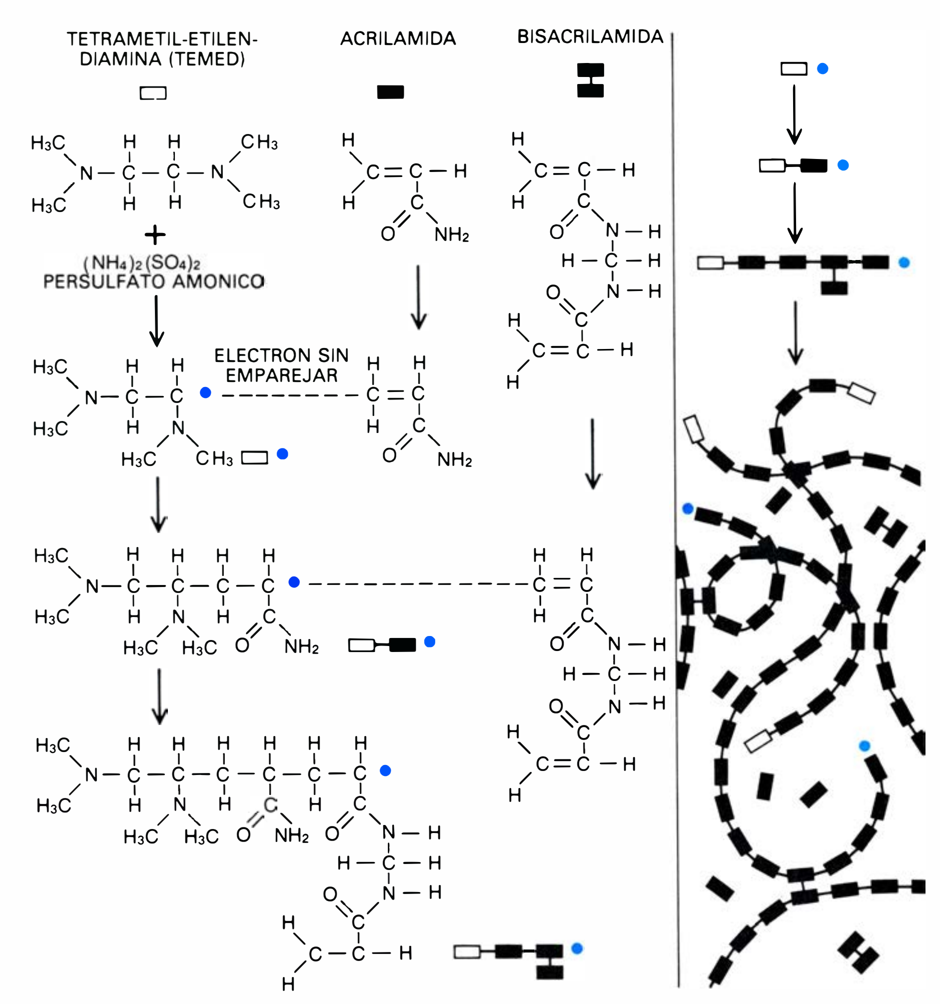


PREPARACION DE UN GEL DE POLIACRILAMIDA. Comienza con dos monómeros (o unidades que se repiten) del polímero, la acrilamida (una molécula orgánica pequeña) y la bisacrilamida, y con dos sustancias que sirven para iniciar la formación del polímero: tetrametil-etilen-diamina (TEMED) y persulfato amónico. Cuando se disuelven estas componentes en agua, se forma en cuestión de minutos una embrollada red de poliacrilamida. El polímero se dispersa a través del agua; el gel rellena la vasija donde se produce la reacción. Se extrae el gel de la cubeta y se somete a un proceso de lavado. La etapa final del proceso, una hidrolización más o menos prolongada, tiene una influencia decisiva sobre el tipo de transiciones de fase del gel.

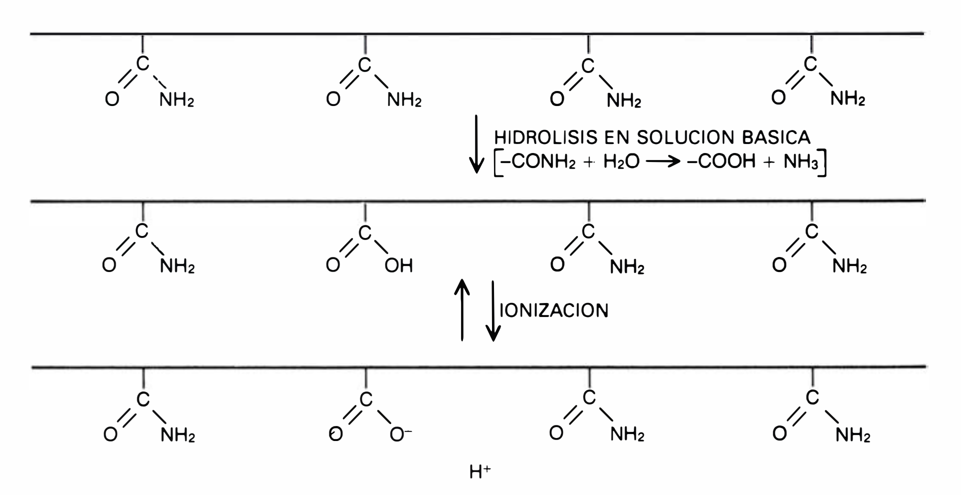
drolizan en una disolución básica durante diferentes períodos de tiempo hasta un máximo de 60 días. A continuación, los geles se "hinchan" con agua. [Lo que se hace es introducirlos en agua y dejarlos "absorber" agua hasta que se alcanza un cierto equilibrio.] Un gel totalmente hidrolizado alcanza un volumen 30 veces su volumen inicial. Después, los geles se introducen en mezclas de acetona y agua, observándose su evolución durante varios días. Dependiendo del tiempo de hidrólisis y las proporciones de acetona y agua en la disolución, se observa que algunos de estos geles sufren una contracción.

Consideremos, primero, un gel para el cual se haya omitido totalmente el proceso de hidrólisis (tiempo de hidrólisis igual a cero). Si colocamos una muestra de este gel en una disolución acuosa con un bajo contenido de acetona, el gel permanecerá hinchado. Si la proporción de acetona es algo mayor (un 20 por ciento), el gel se contraerá levemente. Cuando la concentración de acetona alcanza un 60 por ciento, la contracción del gel alcanza un valor considerable, quizás hasta un factor de 10. Tratando de esta forma diversas muestras del gel (siempre con muestras que no hayan sufrido el proceso de hidrólisis) para diferentes mezclas de agua y acetona, se puede construir una gráfica que muestre el cambio en el volumen del gel en función de la concentración de acetona. Para el gel no hidrolizado, la gráfica es una curva suave. La relación entre el volumen del gel y la concentración de acetona no mantiene una proporcionalidad estricta (en este caso, la gráfica sería una línea recta), pero al menos la curva no tiene cambios bruscos ni ningún otro tipo de discontinuidades.

Supongamos ahora que la misma secuencia de ensayos se lleva a cabo con otros geles que hayan sido expuestos a hidrólisis progresivamente mayores. Para un gel hidrolizado durante dos días, esta curva, que denominaremos curva de dilatación, es aún suave, pero tiene un punto de inflexión, donde el trazado se convierte brevemente en horizontal. Como antes, el gel se va contrayendo poco a poco a medida que aumenta la cantidad de acetona en la disolución, desde cero hasta aproximadamente el 40 por ciento. Sin embargo, cerca del punto de inflexión, que corresponde a una concentración de acetona del 42 por ciento, el gel es muy sensible a pequeños cambios en la proporción de acetona y agua en la disolu-



POLIMERIZACION DE UN GEL realizada mediante una reacción en cadena. El primer paso es la activación de TEMED por persulfato amónico, al quedarse la molécula de TEMED con un electrón de valencia sin emparejar. El TEMED puede combinarse con acrilamida, quedando ésta activada en el proceso. Conforme se van añadiendo nuevas unidades de acrilamida a la cadena, el centro activo se va desplazando hacia el extremo libre. Una molécula de bisacrilamida, que consta de dos unidades de acrilamida unidas por sus grupos $-CONH_2$ (grupo carbonilamida), puede incorporarse, a la vez, a dos de estas cadenas formando una unión permanente entre ambas. El polímero del gel tiene una configuración topológicamente compleja, con una gran cantidad de vueltas, ramificaciones e interconexiones.



HIDROLISIS DEL GEL: altera algunos de los grupos funcionales $-CONH_2$ que aparecen como ramas laterales en el polímero. La hidrólisis se realiza en una solución básica (con un *p*H de aproximadamente 12), en la cual un grupo carbonilamida $-CONH_2$ puede transformarse en un grupo carboxilo ($-COOH$). La proporción de grupos transformados depende del tiempo de hidrólisis; el máximo posible, aproximadamente un 25 por ciento, se alcanza a los 60 días. El grupo carboxilo constituye la unidad funcional de un ácido orgánico; algunos de ellos se ionizan espontáneamente. Los hidrogeniones (H^+) cargados positivamente entran en disolución, quedando el polímero cargado negativamente. (Ilustración de Gabor Kiss.)

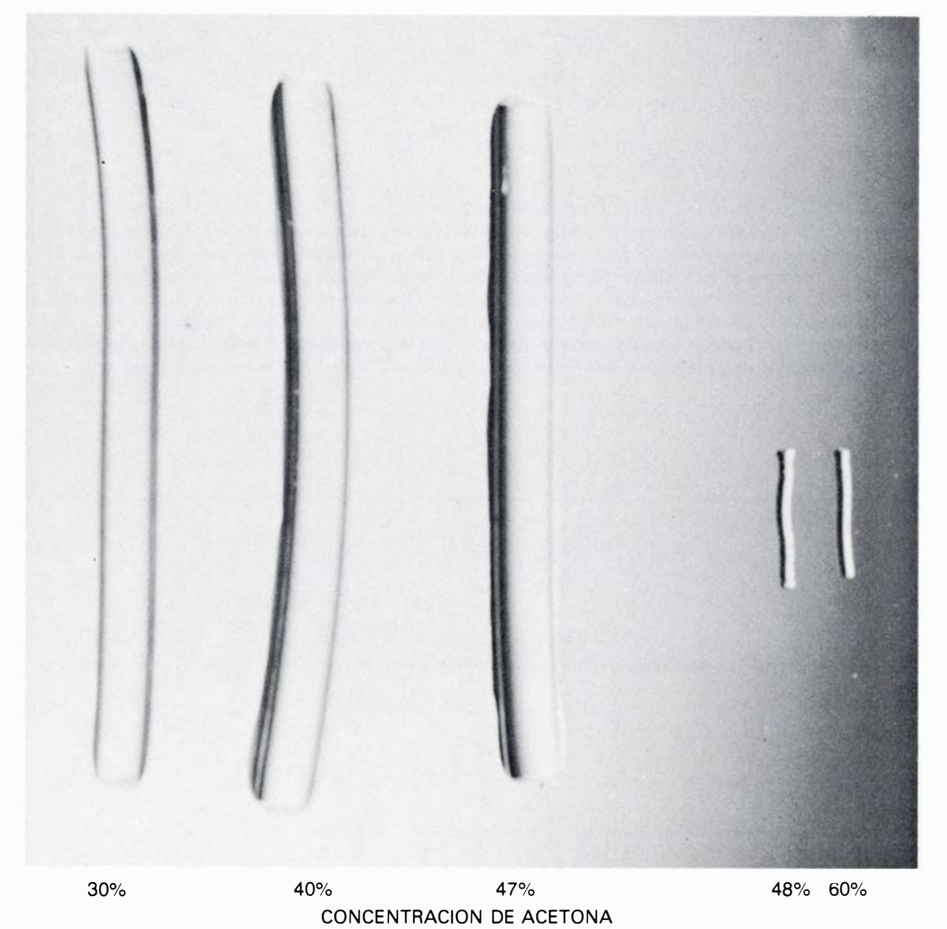
ción. Un pequeño cambio en la concentración provoca un cambio considerable en el volumen del gel. Por ejemplo, al aumentar el contenido en acetona desde el 40 al 45 por ciento, el gel puede contraerse hasta ocupar un volumen igual a la décima parte de su volumen anterior (al 40 por ciento). Aumentos posteriores en la concentración de acetona sólo producirán una leve contracción adicional.

Con tiempos de hidrólisis aún mayores, la sensibilidad del gel frente a cambios en la concentración de acetona se hace infinita. La curva de dilatación adquiere, entonces, una discontinuidad que representa una transición de fase discreta. Tras cuatro días de hidrólisis, por ejemplo, el gel se contrae sólo gradualmente hasta que la concentración de acetona alcanza alrededor de un 40 por ciento. Sin embargo, para un 42 por ciento de contenido en acetona, el gel colapsa abruptamente. Hay una reducción finita en el volumen (de nuevo según un factor de 10 o más) como respuesta a un cambio infinitesimal en la concentración de acetona. Con independencia de la pequeñez del aumento de concentración, se observa siempre la misma contracción. Por tanto, la gráfica tiene un "salto" que no puede ajustarse suavemente en la curva.

El colapso abrupto del gel ocurre de una forma aún más drástica si duró más tiempo de hidrólisis. Un gel que haya sido hidrolizado durante 60 días puede contraerse en un factor de más de 350 cuando la concentración de acetona pasa desde cero hasta un valor alto. Además, casi toda esta contracción tiene lugar en una transición discreta, o discontinua. La curva de dilatación tiende hacia una forma límite similar a un escalón abrupto.

La contracción de un gel cuando se expone a una alta concentración de acetona es totalmente reversible. Si un gel colapsado se coloca en una disolución con menor contenido en acetona, el gel se expande de nuevo, y si se coloca en agua pura, continúa expandiéndose hasta alcanzar su volumen de partida. [No hemos de confundir éste con el volumen inicial; el volumen de partida es el ocupado por el gel tras "hincharse" de agua.] La misma discontinuidad puede observarse durante la transición inversa: un gel totalmente hidrolizado se expande abruptamente cuando la concentración de acetona cae por debajo del valor de la transición.

Es importante entender la dinámica de estos procesos de dilatación y contracción. Los cambios en el volumen del gel no son rápidos o repentinos. Por ejemplo, una nueva disolución tarda unos 30 minutos en impregnar totalmente por difusión un gel de un centímetro de longitud. La contracción o dilatación que sigue a un cambio en la concentración de acetona puede tardar mucho más tiempo en producirse totalmente; varios días quizá. Las transiciones son abruptas sólo en el sentido de que pueden ser provocadas por un cambio arbitrariamente pequeño en la composición de la disolución.



COLAPSO ABRUPTO de un gel de poliacrilamida. Dicho fenómeno se interpreta como una transición de fase. Todos los geles fueron preparados de la misma forma y tenían inicialmente el mismo volumen, habiendo sido sometidos a hidrólisis durante 15 días. Se colocaron luego las muestras en mezclas de acetona y agua con diferentes concentraciones de acetona. Como puede apreciarse, el volumen del gel se vio poco afectado por la disolución, si el contenido en acetona era menor del 47 por ciento. Sin embargo, en cualquier mezcla que tenga una mayor concentración de acetona, el gel se reducirá a una pequeña fracción de su volumen inicial. La transición es discreta en el sentido de que un cambio pequeño en la composición del solvente provoca un gran cambio en el volumen del gel, pero es continua en el tiempo.

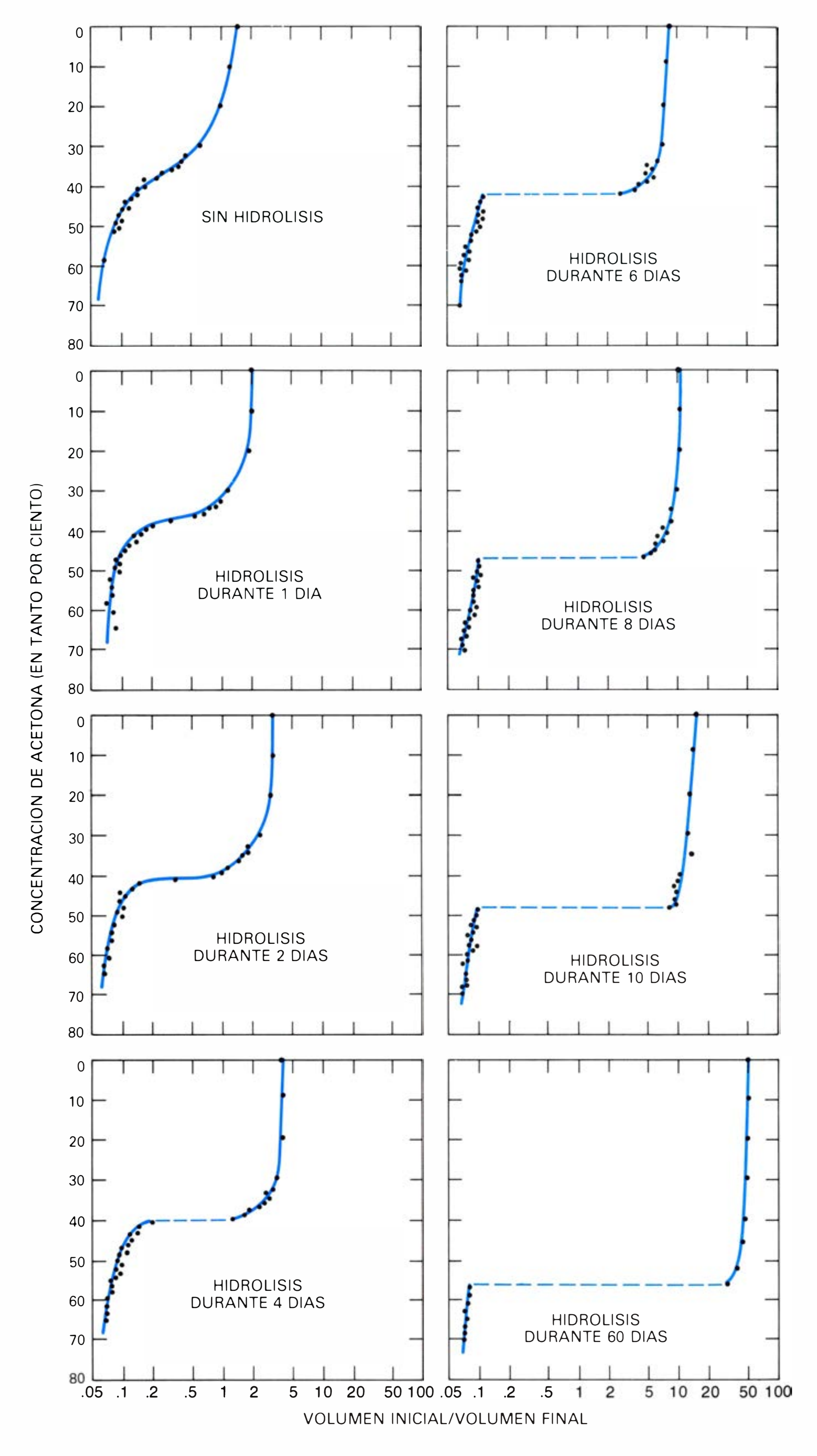
A lo largo de la exposición se ha supuesto tácitamente que la concentración de acetona era el único parámetro que se variaba. En particular, se ha supuesto que los experimentos se llevan a cabo a una temperatura fija. Todos estos mismos fenómenos pueden observarse manteniendo constante la proporción entre acetona y agua en la disolución y variando la temperatura. A temperaturas altas, el gel se expande y, a temperaturas bajas, se contrae. Además, si el grado de hidrólisis es lo suficientemente elevado, se da una transición discontinua. Si un gel que haya sido hidrolizado durante cuatro días se coloca en una disolución con un 42 por ciento de acetona, se observará la transición a temperatura ambiente, aproximadamente 22 grados Celsius. Por supuesto, no hay nada especial que distinga las condiciones de 42 por ciento de acetona y 22 grados Celsius de las demás; estas dos condiciones simplemente determinan el punto de transición, al igual que 100 grados Celsius y una presión de una atmósfera determinan conjuntamente el punto de ebullición del agua. Si se aumenta la concentración de acetona, aumentaría la temperatura a que se produce la transición.

¿A qué se deben estos cambios en el volumen del gel cuando se calienta o enfría, o cuando se cambian las condiciones de la disolución en que se encuentra inmerso? ¿Por qué dependen del grado de hidrólisis la magnitud del cambio y la brusquedad de la transi-

ción? Para responder a estas preguntas es necesario examinar todas las fuerzas, o presiones, que actúan sobre la red del polímero. Se han identificado tres de tales fuerzas: la presión elástica, la afinidad polímero-polímero y la presión de iones hidrógeno. La presión total que actúa sobre el gel es la suma de estas tres componentes, y la denominaremos presión osmótica, ya que determina si el gel tiende a absorber líquido o a expulsarlo.

La presión elástica de la red proviene de la propia elasticidad de los elementos que la componen; en otras palabras, proviene de la resistencia que dichos elementos ofrecen a la contracción o dilatación. (Un mecanismo similar al que se observa en una cinta elástica, de ahí su nombre.) Un tramo lineal del polímero puede representarse como una cadena de eslabones rígidos, pero libremente enlazados, que están en constante movimiento debido a su energía térmica. Supongamos que una cadena de estas características se mantiene con sus extremos en posiciones fijas. Si los extremos están bastante alejados entre sí, de forma que la cadena se encuentre casi totalmente extendida, la agitación térmica de los eslabones originará una fuerza que, en promedio, tenderá a acercar los extremos de la cadena. Por otro lado, si los extremos se colocan muy próximos, de modo que la cadena quede arrugada entre ellos, los movimientos aleatorios de los segmentos tenderán a apartar estos extremos. Entre las dos situaciones límite, debe haber una cierta distancia entre extremos para la cual la fuerza media sea nula, de modo que dicho tramo de la red no tienda a extenderse ni a contraerse. Puede demostrarse matemáticamente que este equilibrio se alcanza cuando los extremos están separados una distancia igual a la raíz cuadrada del número de eslabones multiplicado por la longitud de un eslabón.

Para un tramo del polímero con cualquier otra configuración (no ya lineal), dicha fuerza depende de la intensidad con que los segmentos se están moviendo. Por hallarse inducidos térmicamente, estos movimientos son proporcionales a la temperatura absoluta; así pues, la fuerza restauradora que tiende a extender o contraer la cadena, hasta que alcance su longitud de equilibrio, es proporcional a la temperatura. Debe resaltarse que la temperatura no tiene ninguna influencia sobre el sentido de esta fuerza, que está determinado únicamente por si la cadena se encuentra en un comienzo extendida o



ESTAS CURVAS DE DILATACION muestran el cambio en el volumen del gel cuando se introduce en solventes con diferente concentración de acetona. A medida que aumenta el contenido en acetona, que en las ilustraciones se da en porcentajes, el gel se va contrayendo; la magnitud del cambio en el volumen y la forma de la curva de dilatación dependen estrechamente del grado de ionización del gel. Para un gel que no se halle sometido a hidrólisis, la curva es suave y continua, reduciéndose el volumen a la décima parte, aproximadamente. Los geles hidrolizados muestran un cambio de volumen mayor. Además, a los dos días de la hidrólisis, aparece un punto de inflexión en la curva de dilatación, donde la pendiente se hace horizontal; con mayores tiempos de hidrólisis el punto de inflexión se convierte en una discontinuidad. En la discontinuidad, un aumento infinitesimal en la concentración de acetona provoca una gran reducción del volumen; el gel se colapsa. El colapso es una transición discreta, donde se separa el gel en una fase condensada y otra más rarificada. Tras 60 días de hidrólisis, el volumen cambia en un factor de 350.

contraída con respecto a su longitud de equilibrio. La temperatura sólo influye sobre la magnitud de la fuerza.

El polímero de un gel no es un elemento individual lineal, sino una red topológicamente compleja. Por otro lado, no suele conocerse la configuración exacta del polímero, de modo que no puede calcularse directamente la presión elástica debida a las fuerzas elásticas sobre cada uno de los elementos, que componen la red del polímero. A pesar de todo, pueden deducirse algunas propiedades de esta presión. Si el gel está dilatado, de suerte que la mayoría de los tramos del polímero muestren una longitud mayor que su longitud de equilibrio, la presión elástica tenderá a contraer el gel. Análogamente, un gel colapsado tenderá a expandirse bajo la influencia de esta presión. De esta forma, una fuerza de tensión o contracción sobre cada tramo del polímetro origina una presión sobre el gel como un todo. Por convenio, se considera una presión positiva si tiende a expandir el gel y, negativa, si tiende a comprimirlo. Mientras que el signo de la presión elástica depende del volumen del gel, su magnitud, está determinada por la temperatura. Aumentando la temperatura, se acentúa la tendencia de un gel colapsado a expandirse y la de un gel dilatado a contraerse.

La segunda fuerza que actúa sobre el gel, la afinidad polímero-polímero, se debe a la interacción entre los distintos tramos del polímero y el líquido. Dicha interacción puede ser atractiva o repulsiva, dependiendo principalmente de las propiedades eléctricas de las moléculas. Cuando la interacción es atractiva, el polímero puede reducir su energía total rodeándose de moléculas de solvente (líquido intersticial); cuando la interacción es repulsiva, el polímero rechaza el solvente.

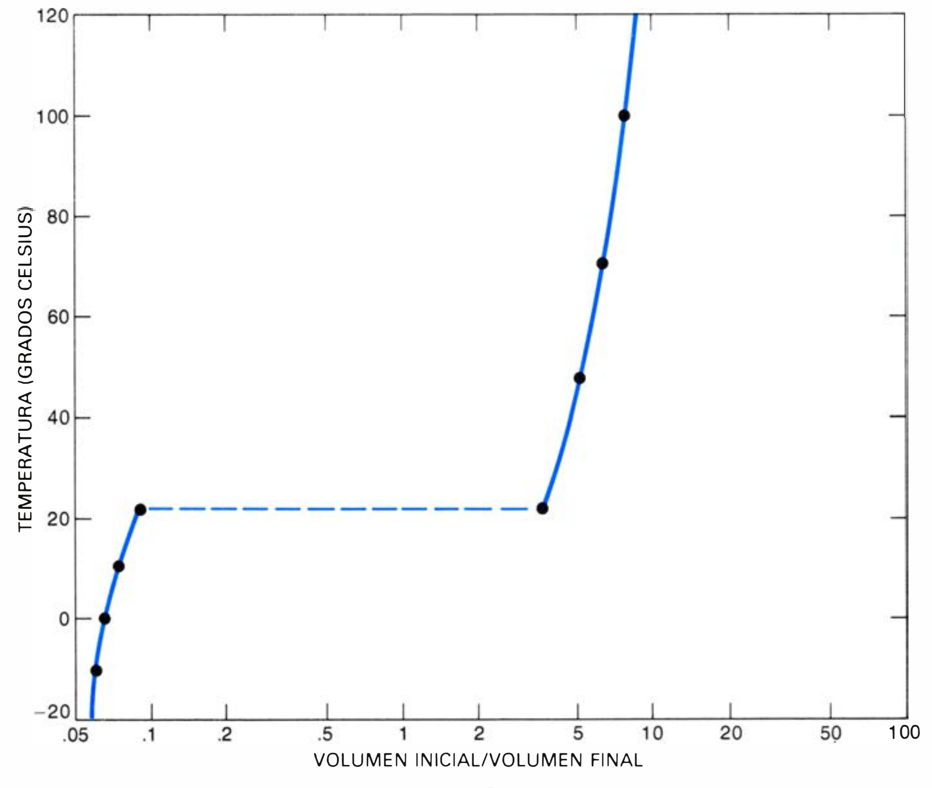
En un gel de acrilamida, en el cual el disolvente es una mezcla de agua y acetona, cada tramo del polímero tiene una afinidad por otros tramos mayor que por las moléculas del disolvente. Debido a ello, los polímeros tienden a coagularse y la afinidad polímero-polímero crea una presión negativa que, en ausencia de otras fuerzas, colapsaría el gel. Esta presión negativa, independiente de la temperatura, depende de la composición del disolvente. La acrilamida es menos soluble en acetona que en agua, de modo que la presión será tanto más negativa (mayor en valor absoluto) cuanto mayor sea la concentración de acetona.

Esta presión debida a la afinidad polímero-polímero también depende del volumen del gel. La afinidad es una fuerza de corto alcance; se muestra eficaz sólo si dos tramos del polímero están en contacto. La probabilidad de que este contacto entre dos tramos de la red se produzca resulta inversamente proporcional a la raíz cuadrada del volumen del gel. Por tanto, según se contrae el gel, la presión atractiva (negativa) aumenta en valor absoluto, y cuando el gel se expande, disminuye la resistencia a una expansión posterior.

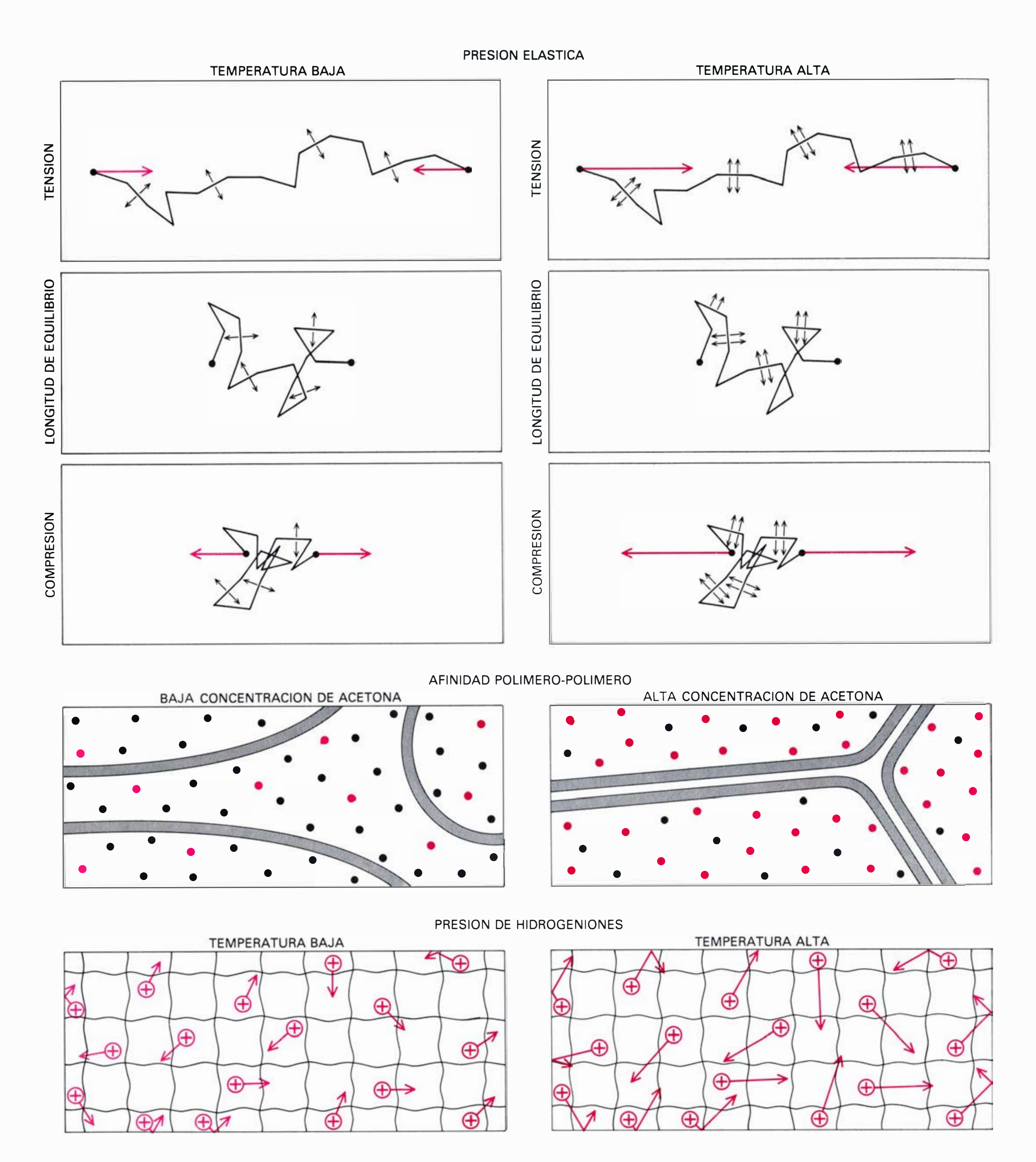
La tercera y última contribución a la presión osmótica del gel, la presión de hidrogeniones, está asociada con la ionización de la red, que libera gran cantidad de iones hidrógeno, cargados positivamente (H^+), en el líquido intersticial. Si estos iones fuesen las únicas cargas presentes, se repelerían fuertemente unos a otros; de hecho, la fuerza de repulsión eléctrica empequeñecería todas las demás fuerzas y destrozaría rápidamente el gel. Pero lo que ocurre es que los iones positivos se encuentran inmersos en un mar de cargas negativas adheridas a la red, dando como resultado que el gel permanezca eléctricamente neutro en su conjunto. La repulsión mutua entre los hidrogeniones está apantallada por la totalidad de las cargas negativas y los iones actúan como si fuesen partículas sin carga.

De cualquier forma, los hidrogeniones originan una presión. Siempre que los iones permanezcan dentro del volumen del gel, se moverán libremente, como si se tratara de moléculas de un gas. Por otro lado, no pueden abandonar el gel, debido a la fuerte atracción eléctrica entre los iones y los polímeros cargados negativamente. En consecuencia, los hidrogeniones actúan como un gas confinado en una vasija y su movimiento aleatorio genera una presión positiva, de la misma manera que las moléculas que se mueven en una botella de aire comprimido originan una presión. Esta presión es directamente proporcional a la temperatura absoluta, es decir, si el volumen del gel se mantiene constante, un aumento de la temperatura provoca un aumento en la presión de hidrogeniones, e inversamente proporcional al volumen: expandiendo el gel se diluye el "gas".

Hemos analizado, hasta aquí, el efecto de cada una de las tres componentes por separado. En la realidad, las propiedades del gel vienen dadas por la competición entre estas componentes. Las transiciones de fase que hemos mencionado antes tienen su origen en un cambio en el equilibrio de las fuerzas que actúan sobre el gel. Y se puede construir un diagrama de fases para el



AL MODIFICAR LA TEMPERATURA se provoca una transición de fase en un gel inmerso en una mezcla de agua y acetona de composición fija. En este caso, la mezcla tiene un 42 por ciento de acetona, y el gel se colapsa cuando se enfría hasta la temperatura ambiente: 22 grados Celsius. Estas transiciones son reversibles; si el gel se calienta, se dilata a 22 grados Celsius y recupera su volumen anterior. El gel fue hidrolizado durante 8 días; hidrólisis mayores aumentan la discontinuidad en la curva de dilatación.



PRESION OSMOTICA DE UN GEL, que determina si el gel tiende a absorber o a expulsar líquido. Se trata de la suma de tres contribuciones. La presión elástica proviene de la resistencia a la extensión o compresión de cada tramo de la red. Un tramo de la red puede representarse como una cadena de eslabones rígidos que están en constante movimiento térmico. Si la cadena está casi totalmente extendida, los movimientos de los eslabones originan una tensión que tiende a juntar los extremos de la cadena. Si la cadena está comprimida, dicha fuerza tiende a separar los extremos. Para una longitud intermedia, la fuerza es cero. Debido a que los movimientos térmicos originan esta fuerza, la magnitud de la presión elástica es proporcional a la temperatura absoluta. La afinidad polímero-polímero se origina por una interacción de las ramas de poliacrilamida con el líquido intersticial del gel. El polímero es más soluble en agua (*puntos negros*) que en acetona (*puntos en color*). Cuando la concentración de acetona es alta, dos ramas del polímero pueden reducir su energía total coagulándose y expulsando el solvente del espacio entre ambas. La afinidad polímero-polímero es siempre una presión negativa, que tiende a contraer el gel. Su magnitud aumenta con la concentración de acetona y es independiente de la temperatura. La tercera contribución es la presión de hidrogeniones. En el interior del gel, los hidrogeniones, cargados positivamente, están neutralizados por la totalidad de cargas negativas adheridas a la red del polímero, por tanto, los iones pueden moverse libremente, como si se tratase de moléculas de un gas confinadas en el gel. Los movimientos térmicos de estos iones dan origen a una presión, que al igual que en el caso de un gas, es proporcional a la temperatura absoluta. La presión de hidrogeniones depende, además, del número de iones presentes: del tiempo de hidrólisis. Los experimentos con poliacrilamidas se realizaron en el laboratorio del autor.

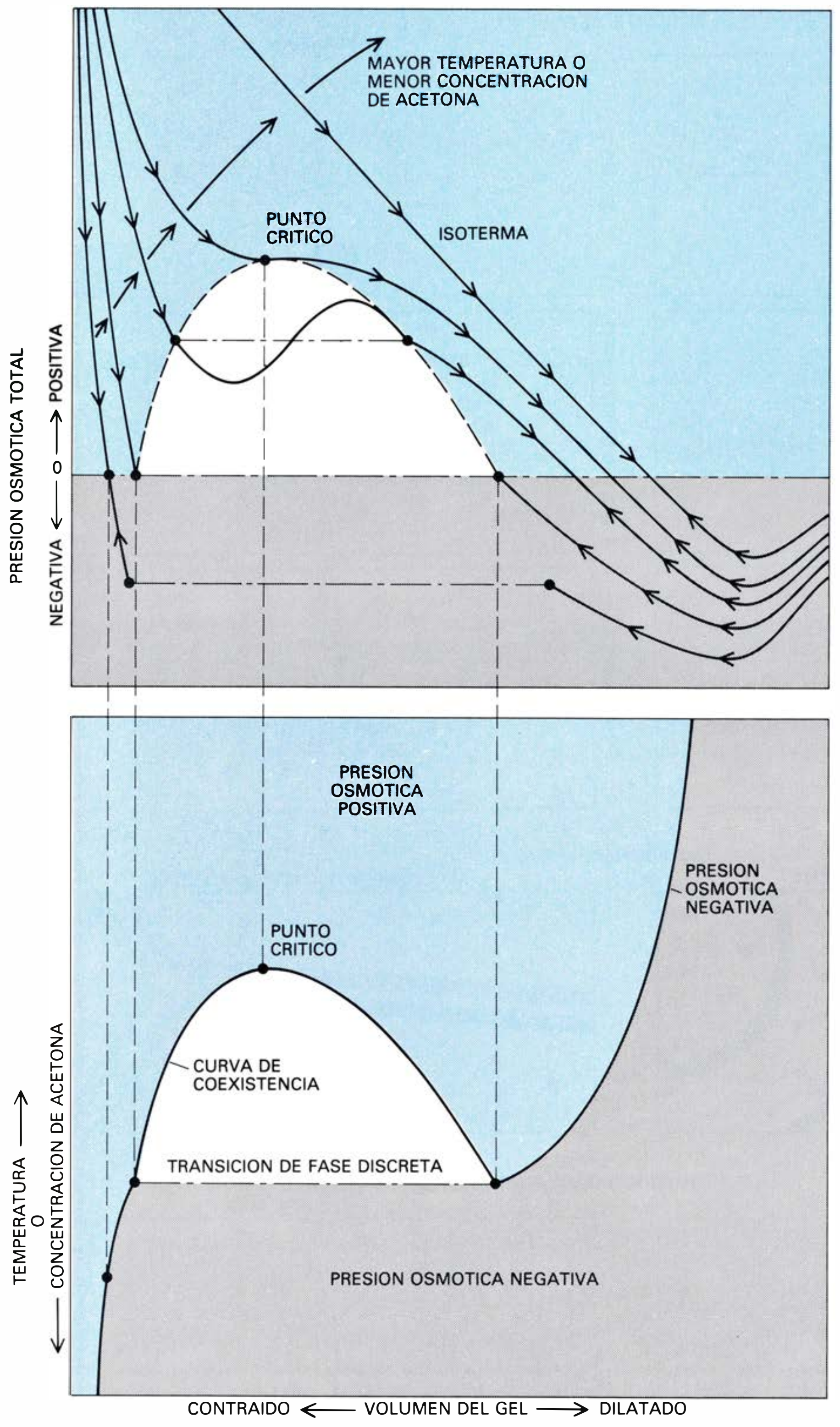


DIAGRAMA DE FASES de un gel. Se construye calculando la presión osmótica para diferentes combinaciones de volumen y bien temperatura o bien concentración de acetona. En el diagrama superior, se presenta esta información como una serie de isotermas, que son curvas que especifican todas las posibles combinaciones de presión y volumen a una temperatura (o concentración de acetona) dada. La isoterma correspondiente a la mayor temperatura define una sencilla relación entre volumen y presión; conforme se expande un gel, disminuye continuamente la presión. Sin embargo, para menores temperaturas las isotermas ofrecen, primero, un punto de inflexión (una pendiente horizontal en un punto de la isoterma) y, después, una curiosa ondulación en forma de *S*. La zona de pendiente positiva de la curva en la ondulación corresponde a una compresibilidad del gel negativa: según se expande el gel, la presión aumenta, favoreciéndose así el que la expansión continúe. Debido a que esta condición es inestable, la región en forma de *S* de la curva debe sustituirse por una línea recta horizontal que corte áreas iguales en los dos lóbulos de la *S*. Siempre que sea posible, el gel ajustará su volumen, de modo que la presión osmótica sea cero; por tanto, un punto que represente el estado del gel viajará a lo largo de la isoterma hasta alcanzar el eje de presión cero. El diagrama inferior representa el volumen del gel en función de la temperatura o de la concentración de acetona. El contorno del área sombreada indica el volumen correspondiente a una presión osmótica igual a cero, es equivalente a la curva de dilatación e incluye, por último, una transición de fase discreta. Para algunos valores positivos de la presión, coexisten dos fases.

gel, a partir de un análisis cuantitativo de estas fuerzas.

El diagrama se construye calculando cada una de las tres componentes a fin de obtener, tras sumarlas, la presión osmótica total para distintas combinaciones posibles de volumen del gel y bien temperatura o bien concentración de acetona. Esta información se resume en una gráfica de presión osmótica en función del volumen del gel. Se dibujan en este diagrama una serie de curvas que representan, cada una de ellas, todas las posibles combinaciones de presión y volumen para una temperatura o concentración de acetona dada. Estas curvas se denominan isotermas (curvas de temperatura constante).

Un principio esencial para interpretar estas isotermas afirma que, siempre que sea posible, el gel ajustará su volumen, de modo que la presión osmótica total sea nula. Si inicialmente la presión es positiva, el gel absorberá líquido y se expandirá (suponiendo que exista un exceso de fluido disponible y que no haya ningún impedimento exterior a la expansión del gel). Si la presión es negativa, el gel expulsará fluido y se contraerá. La dilatación o contracción continuará hasta que se alcance un equilibrio, en el cual las distintas presiones que actúen sobre el gel se anulen entre sí.

Consideremos una isoterma que describa el estado del gel a una temperatura relativamente alta y para una concentración de acetona baja. Supongamos que, en un principio, el gel ocupa un volumen muy pequeño. Debido a la baja concentración de acetona, la afinidad polímero-polímero, que es siempre una presión negativa, será pequeña. Debido a la alta temperatura, la presión de hidrogeniones, que es siempre positiva, será grande. La presión elástica será también positiva (ya que el gel está contraído) y grande (de nuevo, porque la temperatura es alta). Esta combinación de dos presiones positivas grandes y una presión negativa pequeña conduce, claramente, a una presión osmótica total fuertemente positiva. El gel tenderá, pues, a expandirse, pero a medida que lo haga irá bajando sin solución de continuidad la presión osmótica. La pérdida de presión síguese de la propia expansión, ya que según aumenta el volumen la densidad de hidrogeniones, y, por tanto, la componente de la presión debida a ellos, disminuye. Al mismo tiempo, se extiende la malla del polímero, reduciéndose así la presión elástica. A la larga, la presión elástica acaba por anularse, con lo cual di-

latataciones posteriores provocarán una presión elástica negativa, ya que los tramos de la red llegan a estar estirados, en promedio, más allá de su longitud de equilibrio. Cuando la suma de las tres componentes de la presión osmótica sea nula, la expansión se detendrá. El punto que representa el estado del gel se desplaza a lo largo de la isoterma, pasando por distintas combinaciones de presión y volumen, hasta que se detiene en el punto de intersección de la isoterma con el eje de presión cero.

Se puede generar otra isoterma cambiando una de las condiciones iniciales; es decir, reduciendo la temperatura o aumentando la concentración de acetona. Si se disminuye la temperatura, la presión de hidrogeniones y la presión elástica serán menores que en el caso anterior (pero seguirán siendo positivas para el mismo volumen de partida); si se aumenta la concentración de acetona en la disolución, la afinidad polímero-polímero será mayor

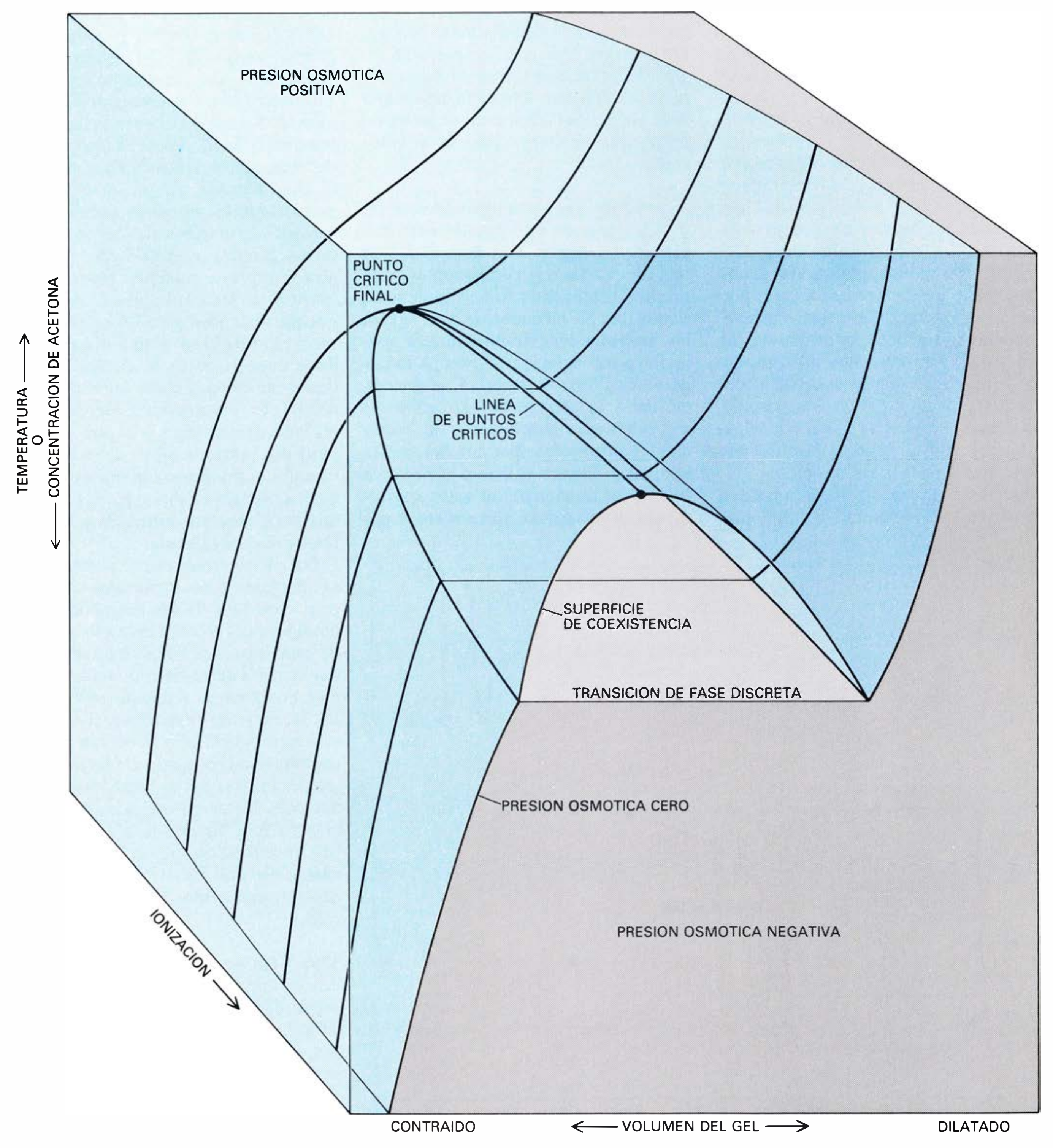
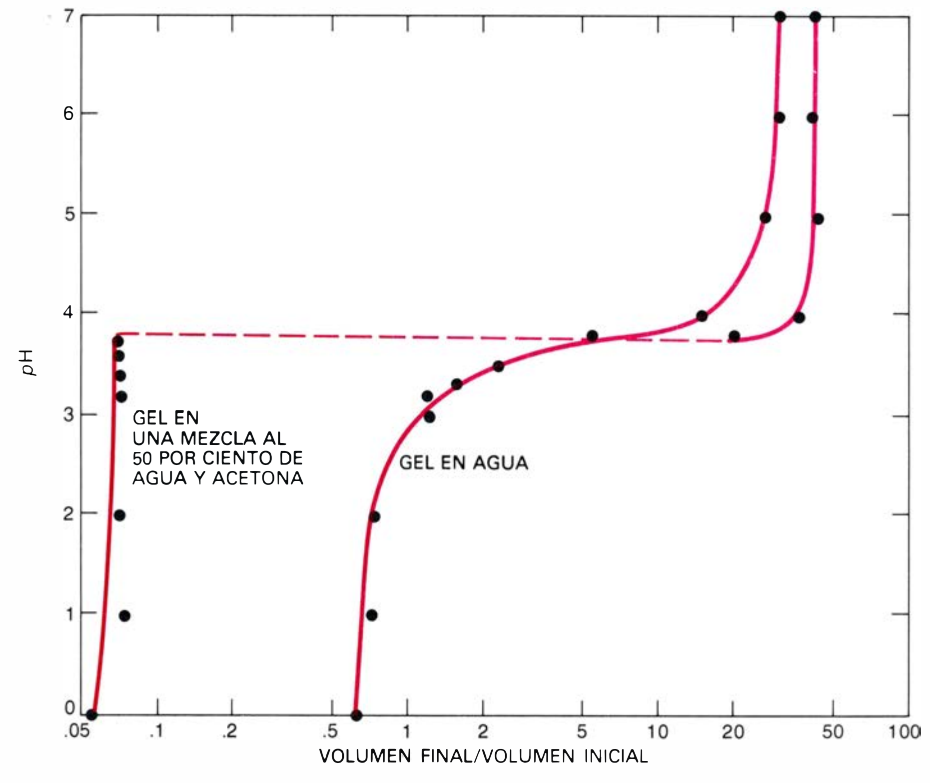


DIAGRAMA DE FASES EN TRES DIMENSIONES. Incluye la influencia de la ionización sobre el estado del gel. La superficie frontal del diagrama equivale al diagrama de fase inferior de la ilustración precedente [*véase la figura de la página opuesta*], y corresponde a un gel que se encuentra totalmente ionizado. En un gel menos ionizado, el cambio en volumen en la transición de fase es menor, la temperatura de transición menor y más próxima a la temperatura crítica y la región del diagrama donde pueden coexistir las dos fases menor también. Por último, la temperatura de transición coincide con la temperatura crítica y desaparece la transición de fase discreta en el gel. Este conjunto de condiciones se conoce con el nombre de punto crítico final.

(en valor absoluto y, como siempre, negativa). En cualquier caso, el efecto neto es una reducción de la presión osmótica positiva en el estado inicial de contracción. Aunque el gel puede expandirse todavía, la presión para un volumen dado es menor que la que le correspondía a este mismo volumen para una mayor temperatura (o menor concentración de acetona). Si las condiciones (temperatura y concentración de acetona) resultan ser las que definen el punto crítico del gel, la curva tiene un punto de inflexión, en el cual la presión permanece momentáneamente constante según continúa aumentado el volumen del gel.

Una posterior reducción de la temperatura, o un aumento del contenido en acetona, conduce a una isoterma con una transición de fase claramente definida. En el gel inicialmente colapsado, la presión osmótica total es aún positiva, aunque menor que en los casos precedentes. Por tanto, el gel se expande; a medida que lo hace, va disminuyendo la presión osmótica. Sin embargo, antes de que la presión se anule, la isoterma presenta una curiosa ondulación. La presión alcanza un mínimo local, la expansión posterior del gel producirá un aumento de la presión osmótica hasta que ésta alcance un máximo local, a partir del cual recuperará su tendencia decreciente. La región comprendida entre el mínimo y el máximo local tiene una compresibilidad negativa: si se aplica una presión mayor a la red del polímero, ésta se expande. Esta extraña condición es claramente inestable. Supongamos una fluctuación térmica que provoca una dilatación infinitesimal de una región del gel; la expansión produciría una mayor presión en esta zona, de modo que se continuaría expandiendo a costa de sus zonas vecinas. De la misma forma, si una pequeña región del gel se contrae espontáneamente, la presión osmótica sería menor que la de las regiones de los alrededores, de modo que la contracción se amplificaría.

¿Cómo puede explicarse una región de compresibilidad negativa? La región está dominada por una sola de las tres componentes de la presión: la afinidad polímero-polímero, siendo las propiedades de esta fuerza las causantes del extraño tramo de pendiente positiva en la isoterma. A lo largo de casi toda la isoterma, la presión elástica y la presión de hidrogeniones son positivas y continuamente decrecientes durante la expansión del gel. La afinidad polímero-polímero es negativa y también disminuye, en valor absoluto, según se separan entre sí las ramas del polímero. La peculiaridad de la zona de compresibilidad negativa reside en el hecho de que, en dicha región, la afinidad polímero-polímero disminuye (en valor absoluto) más rápidamente que las otras dos presiones (por tratarse de una fuerza de corto alcance). Lo que explica que la presión osmótica total positiva aumente.



LA ACIDEZ DEL SOLVENTE es otro parámetro que puede emplearse para controlar el estado de un gel de poliacrilamida. Añadiendo un ácido, se reduce el *p*H y se provoca el colapso del gel. Cuando el solvente es agua, el volumen cambia de modo continuo, pero en una solución al 50 por ciento de acetona y agua (*ordenadas*) existe una transición discreta en el estado del gel. El *p*H del solvente (*curva derecha*) altera la presión osmótica del gel, al reducir la ionización de los grupos carboxilos en la cadena del polímero.

Las isotermas deducidas teóricamente dan una descripción adecuada del equilibrio de presiones, pero en la región de compresibilidad negativa no revelan qué ocurre realmente en el gel. Los procesos que aparecen en dicha región fueron explicados por primera vez por James Clerk Maxwell para el caso de transiciones de fase líquido-vapor en fluidos. Cuando un gel se expande y pierde presión, nunca alcanza el mínimo local de la isoterma, ya que el estado del gel pasa a ser inestable antes de alcanzarse este mínimo. Maxwell demostró que toda la región de la isoterma que tiene forma de *S* debe reemplazarse por una línea recta horizontal. La línea debe trazarse de forma que las dos áreas comprendidas entre dicha línea y la isoterma teórica, una por encima del mínimo local y la otra por debajo del máximo local, sean iguales. Cuando el gel alcanza la línea de Maxwell, se separa en dos regiones (fases), una relativamente contraída y la otra, relativamente dilatada.

De las isotermas puede sacarse toda la información necesaria para una relación completa de las propiedades de equilibrio del gel. Por ejemplo, a partir de estas curvas teóricas se puede obtener la curva de dilatación que examinamos antes en un contexto experimental. La curva de dilatación representa el volumen del gel para el cual la presión osmótica total es nula, en función de la temperatura o de la concentración de acetona. La curva incluye una transición de fase discreta a la temperatura (o concentración de acetona) para la cual la línea de Maxwell horizontal cae justamente sobre el eje de presión cero.

El diagrama de fases del gel tiene tres regiones. Por debajo de la curva de dilatación, la presión osmótica del gel es negativa y, por tanto, la situación es siempre inestable; el gel expulsará fluido y se contraerá hasta que alcance la presión cero (la curva de dilatación). Otra región representa los estados del gel correspondientes a una presión osmótica positiva, que sólo serán estables si no hay líquido en exceso que el gel pueda absorber para expandirse. Entre ambas regiones existe un

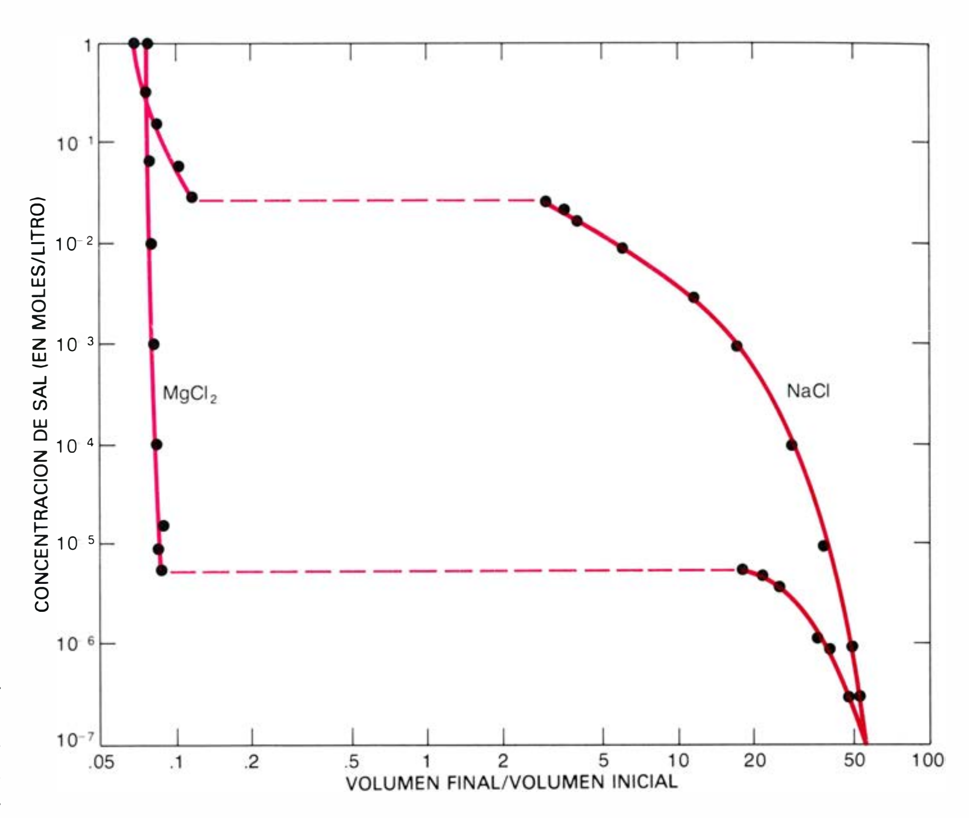
dominio de doble estabilidad, en el cual algunas partes del gel se contraen mientras que otras se dilatan. El contorno de esta región constituye la curva de coexistencia de las dos fases. La diferencia entre los volúmenes del gel en las dos fases es máxima sobre la curva de dilatación, y disminuye uniformemente según aumenta la temperatura. Por último, la curva de coexistencia alcanza una temperatura máxima, en la cual las dos fases son idénticas (les corresponde a ambas el mismo volumen); o en otras palabras, dejan de existir como fases distinguibles. Este es el punto crítico del gel.

Aún no hemos considerado otro factor que ya hemos dicho tiene una importancia decisiva sobre las transiciones de fase en geles: el grado de ionización, determinado por el tiempo de hidrólisis. El cambio en el volumen del gel, que se produce durante la transición de fase, vimos que variaba entre cero (cambio continuo) y 350 veces, dependiendo de la ionización. ¿A qué se debe esta influencia de la ionización sobre la transición de fase?

Parte de la explicación puede obtenerse a partir del diagrama de fases. Se observa que, cuanto menor es la temperatura a que tiene lugar la transición (o mayor la concentración de acetona), mayor es el cambio de volumen que se produce en el gel. Si la temperatura de transición es igual a la temperatura crítica, no hay cambio brusco en el volumen, sino únicamente un punto de inflexión en la curva de dilatación. La línea de Maxwell tiene una longitud mayor entre las dos ramas de la curva de coexistencia, es decir, el cambio en volumen es mayor, según la temperatura de transición disminuye, por debajo de la temperatura crítica.

Parece, por tanto, que el efecto de ionizar la red del polímero consiste en disminuir la temperatura a que se produce la transición de fase, por debajo de la temperatura crítica. Es decir, según aumenta el tiempo de hidrólisis, la transición de fase se produce a una temperatura menor o a una concentración de acetona mayor y conlleva un mayor cambio en el volumen del gel. Ahora bien, ¿cómo puede la ionización desplazar la transición de fase hacia temperaturas menores o mayores concentraciones de acetona?

La respuesta se obtiene volviendo a un análisis de las tres componentes de la presión osmótica. Si el gel está totalmente sin ionizar, no existe una de las tres componentes de la presión osmótica: no hay hidrogeniones y, por tanto, la presión debida a ellos es nula. Bajo estas condiciones, según disminuye la temperatura, la afinidad polímero-polímero (negativa) tiende a colapsar el gel con la única oposición de la presión elástica (que disminuye con la temperatura). Por tanto, la presión negativa puede llegar a ser dominante a una temperatura relativamente alta y el colapso del gel es un proceso continuo.

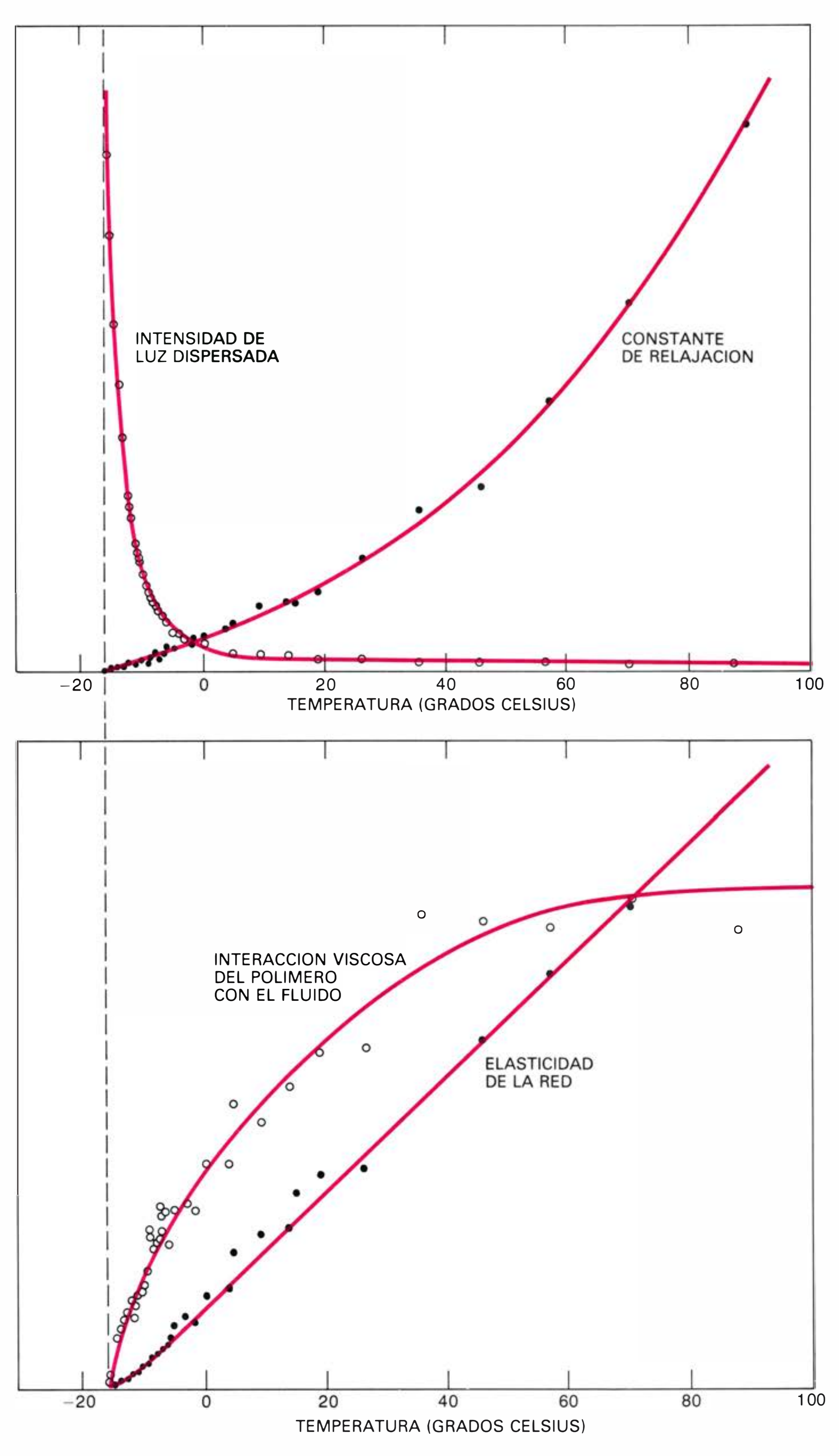


SALES DISUELTAS. También ellas pueden inducir el colapso del gel. Los iones metálicos de la sal (Na^+ y Mg^{++}, por ejemplo), cargados positivamente, reducen a las cargas negativas del polímero, mientras que los iones cloro, negativos, neutralizan los hidrogeniones. Así pues, se reduce la ionización efectiva del polímero. La concentración de sal necesaria para inducir la transición de fase es mucho menor con iones magnesio (divalentes) que con iones sodio (monovalentes). La diferencia es en un factor de unos 4000.

La ionización de la red del polímero da lugar a una presión positiva adicional que se suma a la presión elástica en contra de la afinidad polímero-polímero. Esta nueva presión es capaz de mantener el gel en su fase dilatada hasta menores temperaturas (o mayores concentraciones de acetona), para las cuales la afinidad polímero-polímero es ya mayor que la presión elástica de la red. Así, el colapso del gel se produce a una temperatura (concentración de acetona) menor (mayor) que la correspondiente al punto crítico, de modo que la transición es discontinua.

Podemos construir un diagrama de fase en tres dimensiones, en el cual el estado del gel queda definido por el grado de ionización, el volumen y la temperatura (o la concentración de acetona). La curva de dilatación y la curva de coexistencia del diagrama bidimensional serán, ahora, superficies y el punto crítico, una línea de puntos críticos. Según disminuye el grado de ionización, el volumen encerrado por la curva de coexistencia tiende hacia cero y la temperatura de la transición aumenta. Cuando el volumen encerrado por la curva de coexistencia desaparece no hay una transición discreta, sino únicamente un punto crítico. Para una menor ionización, también desaparece el punto crítico (el punto crítico se encontraría en la región de presión osmótica negativa que es inestable). El extremo de la línea de puntos críticos se denomina punto crítico final.

No sólo ocurren en geles. Transiciones de fase y puntos críticos se obtienen, también, en múltiples sistemas físicos. Los ejemplos más comunes son las transiciones de fase de sólido a líquido y de líquido a vapor que presentan casi todas las sustancias cuando se varían la temperatura y la presión. Un material ferromagnético muestra una transición de fase de un tipo, en cierto modo, diferente: para temperaturas elevadas, los momentos magnéticos de los átomos están orientados aleatoriamente, de modo que el material no se halla magnetizado; ahora bien, cuando la temperatura disminuye hasta un valor característico del material, los momentos atómicos comienzan a alinearse



FLUCTUACIONES CRITICAS en la estructura de un gel. Dichas fluctuaciones se hacen evidentes a partir de mediciones de luz dispersada. La gráfica superior muestra la intensidad de luz dispersada y la constante de relajación de las fluctuaciones de la intensidad de luz dispersada en función de la temperatura. Para temperaturas elevadas, se dispersa muy poca luz; ahora bien, a medida que se enfría el gel hasta la temperatura crítica (aquí unos − 17 grados Celsius) la intensidad de luz dispersada aumenta rápidamente y tiende hacia infinito. A la vez, la constante de relajación, que mide la velocidad con que se forman y desaparecen las fluctuaciones en la densidad del polímero, tiende a cero. La gráfica inferior muestra los cambios en dos propiedades del gel que pueden deducirse a partir de las medidas de la luz dispersada. La elasticidad de la red indica la resistencia del polímero a la deformación. En el punto crítico, la elasticidad se hace cero: la red resulta infinitamente compresible. La interacción viscosa entre la red y el líquido intersticial se anula también en el punto crítico. Esta interacción constituye una medición directa del tamaño de los poros de la red, que adquieren un tamaño muy grande cerca de dicho punto crítico.

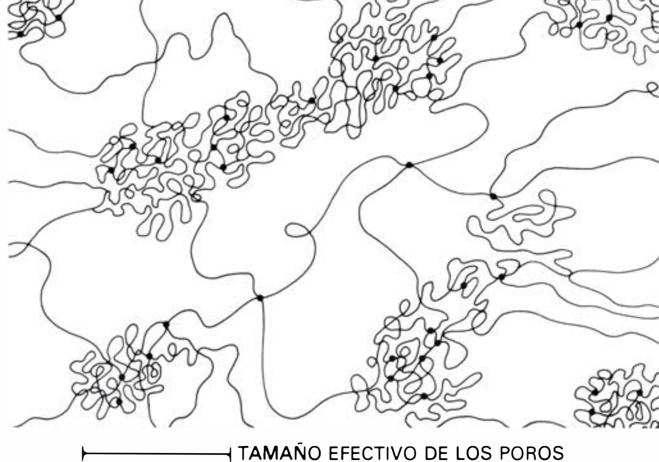
y el material se magnetiza. En una mezcla de dos fluidos, por ejemplo, anilina y ciclo-hexano, puede observarse también una transición de fase: a temperaturas elevadas, los dos componentes se distribuyen uniformemente y la mezcla es homogénea; a la temperatura de transición, aparecen dos fases claramente diferenciables por su distinta composición. El helio presenta varias transiciones de fase a bajas temperaturas; a 4,2 grados Kelvin, se convierte en líquido y a 2 grados Kelvin comienza una nueva fase: el helio superfluido, que fluye con viscosidad nula.

Para todas estas transiciones de fase puede obtenerse un punto crítico, definido por el conjunto de condiciones bajo las cuales desaparece la distinción entre las dos fases. Por ejemplo, en agua hirviendo, coexisten el líquido y el vapor, pero ambas fases son claramente distinguibles por su densidad. Sin embargo, según aumenta la temperatura y la presión, la diferencia en densidades se hace menor; a una presión de 217 atmósferas y una temperatura de 647 grados Kelvin, el líquido y el vapor tienen la misma densidad, sin que, por ende, se les pueda distinguir. Es decir, las dos ramas de la curva de coexistencia convergen hacia un punto crítico. Para mayores temperaturas y presiones hay una única fase: vapor supercondensado.

Varias propiedades interesantes aparecen en la vecindad del punto crítico. En el agua, cuando nos aproximamos al punto crítico por arriba, las fluctuaciones internas de densidad alcanzan un tamaño considerable. Aunque tales fluctuaciones internas están siempre presentes, temperaturas muy superiores a la correspondiente al punto crítico resultan de pequeña amplitud y escala y de vida media muy corta. Cerca del punto crítico, la amplitud de las fluctuaciones aumenta, así como la escala de distancias típicas sobre la que se extienden dichas fluctuaciones. Por otra parte, disminuyen los procesos mediante los cuales las fluctuaciones "relajan", o se desvanecen en el fluido circundante. En el punto crítico, la longitud característica que define la escala de una fluctuación tiende a infinito y la relajación a cero. Estos fenómenos críticos pueden observarse directamente, ya que cuando las fluctuaciones de densidad se aproximan a una escala macroscópica, se convierten en dispersores efectivos de luz. Por ello, el agua aparece lechosa y casi opaca, fenómeno denominado opalescencia crítica.

Fenómenos críticos similares se re-





CONFIGURACION DE LA RED del polímero. Cambia drásticamente al aproximarnos al punto crítico. Para grandes temperaturas, la distribución de las ramas del polímero es aleatoria, aunque uniforme en media. Los movimientos térmicos originan fluctuaciones en la densidad de polímero, pero las fluctuaciones son, en su mayor parte, pequeñas y de muy corta vida media. Cerca del punto crítico, las fluctuaciones crecen en amplitud y escala a medida que se va separando el gel en dominios de densidad diferente. Por debajo del punto crítico, las fluctuaciones quedan congeladas en fases diferenciadas.

gistran en otros sistemas que tienen una transición de fase. En un material ferromagnético son las fluctuaciones en la dirección de magnetización local las que crecen en escala a la vez que disminuye su relajación al aproximarnos al punto crítico. En una mezcla de fluidos, las fluctuaciones son variaciones locales en la composición. Un resultado reciente, en cierto modo sorprendente, demuestra que incluso en sistemas físicos tan diferentes entre sí como los que acabamos de mencionar, los fenómenos críticos pueden tratarse con la misma descripción matemática. Todos los sistemas actualmente conocidos que presentan puntos críticos en sus diagramas de fase pueden agruparse en unas pocas clases; todos los sistemas de la misma clase son matemáticamente idénticos. Los puntos críticos asociados con la transición líquido-vapor, con una mezcla binaria de fluidos y con algunos materiales ferromagnéticos, pertenecen a la misma clase; todos ellos pueden analizarse, pues, con el mismo sistema de ecuaciones. En particular, las fluctuaciones críticas obedecen a las mismas leyes matemáticas, con independencia de que dichas fluctuaciones sean de densidad, concentración y magnetización, respectivamente, en cada caso.

Según parece, los geles deben adscribirse a esa misma clase, aunque esa asignación la habrán de confirmar trabajos posteriores, experimentales y teóricos. Aparte de su clasificación, todos los fenómenos críticos observados en otros sistemas tienen su equivalente en un gel; opalescencia crítica incluida.

Las fluctuaciones críticas en los geles son variaciones locales en la densidad de red del polímero. Debido a la flexibilidad de la red y a que se encuentra en constante movimiento térmico, están formándose y desintegrándose continuamente pequeñas agregaciones de polímero. Asimismo, aparecen y desaparecen rápidamente pequeñas regiones libres de polímero. Cerca del punto crítico, las fluctuaciones en la densidad de polímero, al igual que ocurre en los otros sistemas mencionados, crecen tanto en amplitud como en escala y su tiempo de relajación aumenta. En el punto crítico, estas cantidades tienden a infinito.

La técnica de dispersión de luz láser permite un acceso experimental directo a las fluctuaciones críticas de los geles. Cuando disminuye la temperatura hacia el punto crítico, aumenta la intensidad de la luz dispersada. A la temperatura crítica, el gel es casi opaco, de modo que la relación entre luz dispersada y luz transmitida se aproxima a infinito. También pueden medirse las fluctuaciones en la intensidad dispersada, a partir de las cuales puede obtenerse la constante de relajación (la inversa del tiempo de relajación) de las correspondientes fluctuaciones en la densidad de polímero. Esta constante de relajación tiende a cero cuando nos aproximamos al punto crítico.

La evolución de las fluctuaciones en la red del polímero está gobernada por las propiedades viscoelásticas del gel. Intuitivamente, es de esperar que la amplitud de las fluctuaciones aumente con la temperatura, ya que el movimiento térmico del polímero es la base de estas fluctuaciones. También es razonable esperar que exista cierta relación entre la amplitud y la elasticidad de la red. Puesto que la elasticidad mide la resistencia de la red a una posible deformación, las fluctuaciones deben ser mayores cuando la elasticidad sea menor. Se ha demostrado teóricamente que la amplitud de las fluctuaciones es directamente proporcional a la temperatura absoluta e inversamente proporcional a la elasticidad de la red. La intensidad de luz dispersada constituye así una medida directa del cociente entre estas cantidades. La intensidad de luz dispersada diverge cuando nos aproximamos a un cierto valor de la temperatura (la temperatura crítica), lo cual implica que la elasticidad tiende a cero en ese punto. Es decir, en el punto crítico, la red el polímero no ofrece resistencia alguna a la deformación; es infinitamente compresible.

La constante de relajación puede evaluarse de forma similar. Las fluctuaciones se relajarán rápidamente si la fuerza restauradora, que depende de la elasticidad, es grande, y si la fricción entre la red y el líquido intersticial es pequeña. De nuevo, trabajos teóricos han demostrado que la constante de relajación es directamente proporcional a la elasticidad e inversamente proporcional a la fuerza de fricción. La fricción depende tanto de la viscosidad del líquido intersticial como del tamaño efectivo de los poros en la red del polímero. Puesto que se conoce la elastici-

dad a partir de las mediciones de la intensidad de luz dispersada, y como la viscosidad puede determinarse independientemente, las mediciones de la constante de relajación informan sobre el tamaño de los poros de la red. Por este método, hemos descubierto que los poros son mucho mayores conforme nos vamos aproximando al punto crítico.

¿Cuál es el significado de una compresibilidad infinita? ¿Cómo es posible que, en una red con una interconexión permanente entre sus tramos, crezcan los poros hasta un tamaño varias veces superior a su tamaño normal?

En general, la elasticidad de la red (que no debe confundirse con la presión elástica debida a la elasticidad de los elementos o tramos que componen la red), proviene de la interacción entre la red y el líquido. En el equilibrio, todas las componentes de la presión osmótica, incluyendo cualquier presión exterior que pudiese existir, se compensan entre sí; de modo que la presión total es cero. Si se comprime levemente la red, se genera una presión positiva que actúa de fuerza restauradora, devolviendo el gel a su volumen anterior. Sin embargo, en el punto crítico, no aparece esta fuerza restauradora, ya que en él no sólo están en equilibrio todas las fuerzas que actúan sobre el gel, sino que también continúan en equilibrio tras un ligero cambio en el volumen. Si el gel se expande levemente, las presiones positivas (presión elástica y presión de hidrogeniones) disminuyen; pero también la afinidad polímero-polímero (negativa) se reduce en la misma cantidad y, así, la presión osmótica total continúa siendo nula y no aparece ninguna fuerza que tienda a devolver al gel a su volumen anterior.

Como en el punto crítico, un cambio en el volumen produce un cambio despreciable en la presión; un pequeño cambio en la presión puede provocar un cambio apreciable en el volumen o en la densidad local de polímero. Con esta sensibilidad, incluso perturbaciones infinitesimales en la presión osmótica pueden conducir a fluctuaciones de amplitud finita en la densidad de polímero. Estas son las fluctuaciones críticas, y resuelven la paradoja de los grandes poros en la red. Supongamos que se pudiese hacer una fotografía que captase la configuración de la red a escala microscópica, en un cierto instante. Para temperaturas elevadas, la fotografía mostraría una red complicada, aunque casi homogénea; el tamaño medio de los poros estaría determinado por la distancia media entre retículos y habría poca variación respecto al valor medio. En cambio, cerca del punto crítico, la fotografía mostraría grandes fluctuaciones en la densidad de polímero. Algunas zonas estarían coaguladas, pero entre ellas habría grandes espacios abiertos con una escasa distribución de polímero. El tamaño medio de los poros podría seguir siendo el mismo que en el caso de una mayor temperatura; ahora,el valor medio ya no importa tanto, pues hay dos tipos de poros (coexisten dos fases), unos poros grandes y otros pequeños. El tamaño efectivo de los poros, que determina la interacción viscosa de la red con el líquido intersticial, es el correspondiente a los grandes poros, que son de tamaño macroscópico.

Si en vez de fotografías pudiésemos filmar una película de la red, observaríamos la relajación de las fluctuaciones de densidad de polímero. Para valores de la temperatura algo superiores al valor crítico, las regiones contraídas y las dilatadas estarían continuamente reordenándose entre sí, debido a la agitación térmica. Las regiones de empaquetamiento compactos se desenredarían y las áreas ralas aumentarían su densidad. Según nos aproximáramos al punto crítico, estos reordenamientos serían más lentos y, en el punto crítico, serían infinitamente lentos. A una temperatura aún menor, se estabiliza una configuración particular (una sola frase). Así pues, las regiones coaguladas y las regiones dilatadas representan las distintas fases del gel.

La temperatura y la concentración de acetona no son los únicos parámetros que pueden variarse para inducir una transición de fase en geles de poliacrilamida. Por ejemplo, la acetona puede sustituirse por otros disolventes (alcohol, por ejemplo), que también difieran del agua en su afinidad con el polímero. El colapso del gel puede provocarse, a temperatura y concentración constantes, cambiando el pH de la disolución o añadiendo una sal a la disolución. Ambos factores alteran la ionización efectiva de la red. Añadiendo un ácido, disminuye el pH, o lo que es lo mismo, aumenta la concentración de hidrogeniones; con lo cual, algunos de los grupos carboxilos del polímero se recombinan con los hidrogeniones, muy abundantes, de modo que la presión de hidrogeniones disminuye y el gel colapsa a una temperatura mayor que la correspondiente a una disolución neutra.

Añadiendo una sal, tal como cloruro sódico (NaCl) o cloruro de magnesio ($MgCl_2$), se obtiene el mismo resultado

final, aunque por un camino diferente. Los iones metálicos de la sal, cargados positivamente, se agrupan alrededor de las cargas negativas en el polímero, provocando un apantallamiento de éstas. Por otra parte, los iones de cloro negativos neutralizan los hidrogeniones de la disolución, de manera que se desacoplan el polímero y el sistema de iones disueltos. El resultado final es, de nuevo, una reducción de la presión de hidrogeniones. En nuestro laboratorio, hemos obtenido que la concentración de sal necesaria para inducir el colapso del gel es 4000 veces menor para el ion magnesio (divalente) que para el ion sodio (monovalente). Sorprendentemente, esta gran diferencia puede explicarse por el hecho de que, para neutralizar la red, sólo se precisa la mitad de iones divalentes que de iones monovalentes. Interesa destacar que los iones divalentes desempeñan un papel esencial en la contracción de los músculos, siendo este proceso, en algunos aspectos, muy semejante al colapso de un gel.

Otra forma de inducir una transición de fase es aplicando un campo eléctrico a través del gel. Si un gel, en una mezcla al 50 por ciento de agua y acetona, se sitúa entre dos electrodos, puede provocarse su colapso imponiendo un pequeño campo eléctrico, aproximadamente de medio volt por centímetro.

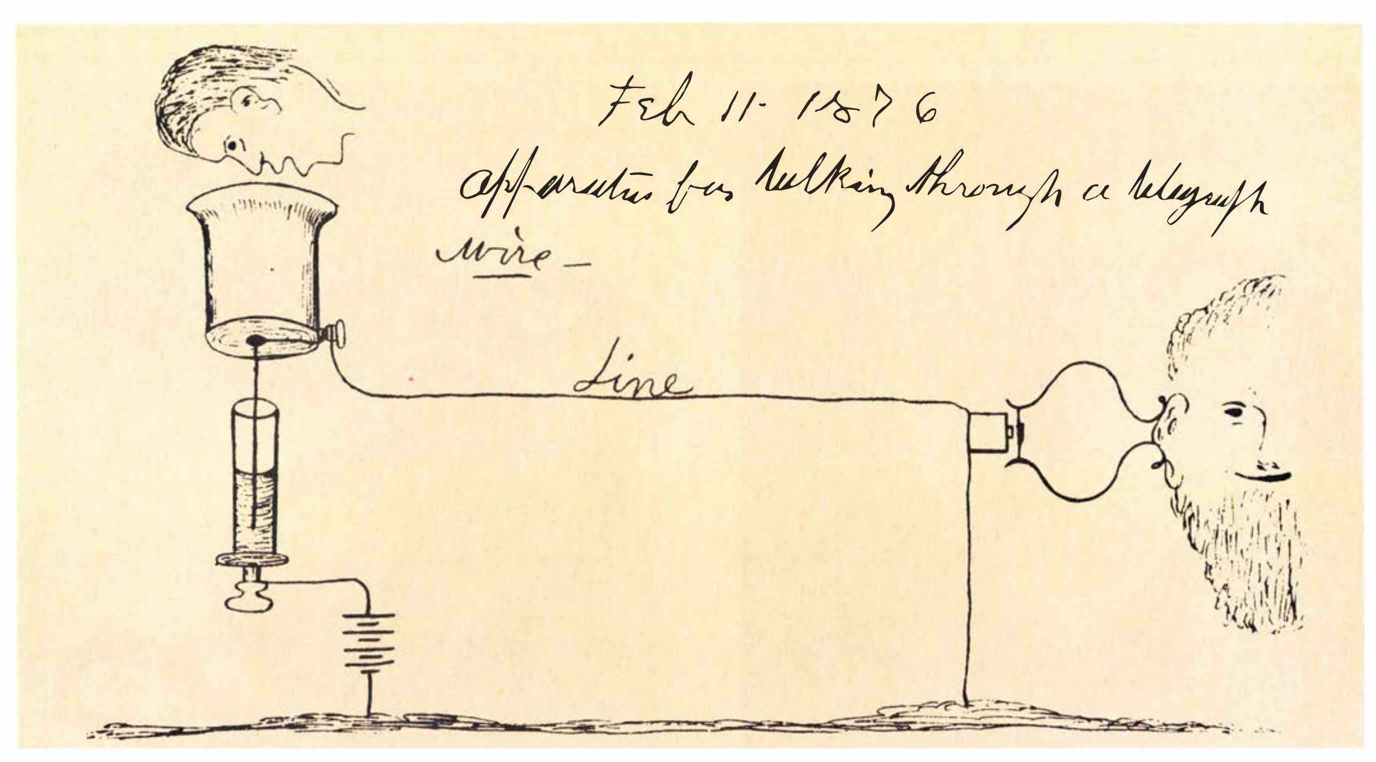
El campo eléctrico afecta tanto a las cargas negativas como a las positivas en el gel. Los hidrogeniones fluyen hacia el electrodo negativo, constituyendo una corriente electroquímica permanente; así pues, el número de iones en el gel es constante en todo momento. La presión de hidrogeniones no se ve afectada por la presencia del campo eléctrico. Por otro lado, las cargas negativas de los grupos carboxilo, adheridos a la red, se atraen por el electrodo positivo arrastrando consigo al polímero. Aunque la fuerza se da en una dirección determinada, origina una presión negativa en el gel al establecer un gradiente de presiones, que varía desde una presión fuertemente negativa junto al electrodo positivo hasta una presión nula en el otro extremo del gel.

La presión originada por el campo eléctrico varía suavemente a lo largo del gel, pero la respuesta del gel es discontinua. En aquellas zonas donde esta presión negativa es suficiente para provocar una transición de fase, el gel se contrae notablemente. Donde la presión es menor que la necesaria para la transición, el volumen cambia sólo levemente. Así, el gel adquiere la forma de una botella, con un cuerpo grueso y un cuello fino. Cambiando la magnitud del campo eléctrico se reajustan las proporciones del cuerpo y del cuello. Cuando se elimina totalmente el campo eléctrico, el gel vuelve a recuperar su forma original.

Un cambio tan drástico en el volumen, que puede provocarse por tal variedad de pequeños estímulos, sugiere algunas posibles aplicaciones de los geles ionizados. Por ejemplo, podría diseñarse una máquina química que funcionase con un gel. Los ciclos de expansión y contracción podrían realizarse a través de cambios de temperatura, composición, *p*H, intensidad iónica, o campo eléctrico. Un tal ingenio es particularmente esperanzador para su uso como músculo artificial. Ya que el cambio en volumen es discreto y predecible, un gel también podría servir de elemento de memoria o de conmutador. También puede imaginarse un cambio de presión que originase un cambio de color del gel, de suerte que los geles pudiesen emplearse en las pantallas de calculadoras, relojes y demás.

En la mayoría de tales aplicaciones, un factor a tener en cuenta será la velocidad de la transición de fase. Como se ha mencionado al principio, un gel con dimensiones del orden de un centímetro tarda varios días en alcanzar un nuevo volumen de equilibrio. Sin embargo, el tiempo necesario resulta ser proporcional a la raíz cuadrada de las dimensiones lineales; tiempo que puede reducirse grandemente, dividiendo el tamaño del gel. Un gel cilíndrico de un micrometro de diámetro, del tamaño de una fibra muscular, se contraería o dilataría en algunas centésimas de segundo.

El desprendimiento de retina en el ojo está causado por un colapso del humor vítreo; el colapso permite a la retina separarse del ojo. El edema de la córnea, otra causa común de ceguera humana, es una opacificación del gel de la córnea que se produce por la separación de las diferentes fases. Investigaciones, más profundas sobre la física de las transiciones de fase en geles habrán de mejorar nuestra comprensión de esos problemas. La capacidad de determinar y controlar el tamaño de los poros puede conducir a mejoras en las técnicas analíticas de electroforesis y cromatografía. Aparte de estas aplicaciones potenciales, conocemos bastante mejor ese estado particular de la materia hoy día, y las técnicas matemáticas para describir fenómenos críticos han mostrado su vigencia en otro sistema físico.



ES EVIDENTE el notable paralelismo existente entre los teléfonos concebidos por Elisha Gray y Alexander Graham Bell, como puede apreciarse en ambas ilustraciones. Los dos transmisores, el de Gray (*arriba*) y el de Bell (*abajo*), se basaban en la variación de resistencia presentada a la corriente que suministraba una pila eléctrica. El movimiento vertical de una aguja sumergida en un líquido producía la variación de resistencia en ambos dispositivos. Dicho movimiento, a su vez, se producía como respuesta de un diafragma a las ondas sonoras de la voz humana. En el transmisor de Gray, la variación de resistencia dependía de la distancia entre el extremo de la aguja y el electrodo inferior. En el de Bell, la variación dependía de la superficie sumergida por el extremo de una aguja en forma de cuña. La corriente variable pasaba entonces por un electroimán (*derecha*) situado en el extremo receptor del circuito. Las variaciones del campo magnético hacían vibrar un diafragma (en el modelo de Gray) o una lámina metálica (en el de Bell), reproduciendo por tanto las ondas sonoras que actuaban sobre el transmisor. Elisha Gray hizo el esquema de su dispositivo el 11 de febrero de 1876, aproximadamente dos meses después de haber concebido la idea. Alexander Graham Bell hizo el suyo el nueve de marzo, a los 24 días de cumplimentar su solicitud de patente.

Historia paralela del teléfono

Cuando Alexander Graham Bell desarrollaba el teléfono, lo mismo hacía Elisha Gray. Aunque el primero de ellos consiguiera la patente, el hecho no deja de ser un instructivo ejemplo de invención simultánea

David A. Hounshell

En el mismo día, el 14 de febrero de 1876, entraban en la Oficina de Patentes de los Estados Unidos dos proyectos que describían la transmisión y recepción de la voz humana por medio de variaciones en la resistencia del transmisor. Este dispositivo de resistencia variable constituía el primer diseño de teléfono. El primer proyecto que solicitaba los derechos de la patente venía firmado por un inventor aficionado, de 29 años de edad, cuyo nombre llegaría a ser famoso en todo el mundo: Alexander Graham Bell. El segundo proyecto, que se recibiría horas más tarde, lo remitía un inventor profesional de 41 años de edad, que había registrado la primera de sus muchas patentes eléctricas hacía ya casi 10 años: Elisha Gray.

¿Quién fue Elisha Gray? ¿Por qué se le reconoce a Bell universalmente, salvo contadas excepciones, la invención del teléfono y el nombre de Gray, quien concibió al mismo tiempo un dispositivo igual, sólo les suena a unos cuantos historiadores de la tecnología? Para contestar a la pregunta, bueno será adentrarnos en el contexto social de este ejemplo clásico de invención simultánea, sin olvidar por supuesto los pormenores técnicos del aparato. En la historia del teléfono, las diferencias entre el medio profesional y el aficionado aparecen siempre. Vamos a intentar demostrarlo explorando primero el ambiente en que se desenvolvió Gray y luego el de Bell.

Elisha Gray nació en 1835 en Barnesville, Ohio. Cursó estudios en el Oberlin College, pero su salud enfermiza le impidió graduarse. Mostró un interés temprano por los aspectos eléctricos de la telegrafía, que le condujo a una primera patente en 1867, un relé telegráfico autorregulable. Su dispositivo atrajo la atención de la principal firma en dicho campo, la Western Union Telegraph Company. También proporcionó a Gray dinero suficiente para adquirir parte de una empresa de Cleveland que fabricaba instrumentos telegráficos. Junto con su socio, Enos Barton, hizo de la compañía la primera fábrica estadounidense de aparatos eléctricos, cambió su nombre por el de Western Electric Manufacturing Company y, a primeros de 1870, trasladó su sede a Chicago. En 1872, la Western Union adquirió la tercera parte de las acciones, a partir de cuyo instante la Western Electric se convirtió en el proveedor exclusivo de equipos telegráficos de la Western Union.

La telegrafía se había ido asentando con solidez en los Estados Unidos desde su introducción en 1844. Su crecimiento registró un fuerte avance durante la guerra civil (1861-1865). Al final del conflicto se habían tendido más de 160.000 kilómetros de hilo telegráfico; la red alcanzaba entonces casi 50.000 kilómetros. Una década más tarde, las cifras se habían elevado a 400.000 kilómetros de cable y 160.000 kilómetros de red. Sin embargo, hasta 1872, sólo podía transmitirse simultáneamente un mensaje y en un único sentido por cable. Para aumentar la capacidad de transmisión entre dos puntos no cabía otra solución que tender nuevos cables.

El cuello de botella que suponía la transmisión simultánea de un solo mensaje por dirección venía determinado por la naturaleza de la señal transmitida por los sistemas telegráficos: la señal estaba constituida por impulsos intermitentes de corriente continua. En 1872, la Western Union adoptó un sistema "dúplex" de transmisión desarrollado por Joseph B. Stearns, un técnico electricista de Boston. El sistema Stearns, que se fundaba en una modificación del sistema Morse, permitió la transmisión simultánea de dos mensajes, uno desde cada extremo del hilo. La introducción del sistema dúplex multiplicaba por dos la capacidad de la red de la Western Union. ¿Podrían desarrollarse sistemas múltiplex, es decir, sistemas que aumentaran en muchas veces la capacidad de la red? Una cosa era cierta: el inventor del sistema múltiplex podría fijar el precio de su patente.

Las estrechas relaciones que Elisha Gray mantenía con la Western Union le permitieron estar al corriente de la recompensa que esperaba al primero que llegara con el proyecto bajo el brazo. Y a principios de 1874, casi por puro azar, encontró la solución. Cierto día vio a su sobrino, a quien le había dejado manipular sus aparatos eléctricos, jugando en el baño con dos circuitos alimentados por una pila eléctrica. En uno de los circuitos la pila hacía vibrar una lámina de un "artilugio" eléctrico. Las vibraciones abrían y cerraban el otro circuito, que constaba de una bobina. El sobrino de Gray había conectado también un conductor del segundo circuito a una bañera de zinc, mientras que, para cerrar el circuito, tocaba con la mano el otro conductor y lo frotaba sobre la superficie de la bañera, provocándose descargas eléctricas.

La vibración de la lámina producía un zumbido audible, y cuando el niño frotaba su mano sobre la bañera, se percibía un segundo zumbido del mismo tono. Esto le llamó la atención a Gray. Alteró la frecuencia de la lámina y descubrió que el sonido producido al frotar con su mano la bañera también cambiaba en el mismo sentido. El efecto de la bobina de inducción consistía en transformar los impulsos "abierto-cerrado", impuestos al circuito por la vibración de la lámina, en una onda sinusoidal de corriente eléctrica.

Gray se puso a investigar el fenómeno de lo que él llamaba corrientes vibratorias, esperando descubrir alguna utilidad práctica para su transmisión y recepción. Aunque no encontró una aplicación inmediata, estaba tan plenamente convencido de que las corrientes vibratorias tendrían una utilidad impor-

tante, que renunció a su cargo de superintendente de la Western Electric y decidió continuar el asunto a su aire y con dedicación exclusiva. Para ello consiguió el respaldo financiero de Samuel S. White, un rico fabricante de equipos odontológicos de Filadelfia.

Con recursos económicos a su disposición, construyó cuatro dispositivos experimentales: dos transmisores de audiofrecuencia y dos receptores. A uno de los transmisores lo denominó de tono simple; consistía esencialmente en una depuración de los aparatos que su sobrino utilizó en la bañera. Llamó al otro transmisor de doble tono, y podía generar ondas sinusoidales de dos frecuencias distintas. Visto en retrospectiva, uno de los dos receptores parece original; el otro era bastante convencional.

El primer receptor constaba de un violín sin cuerdas y una lámina de plata sujeta a la caja de resonancia del violín. Cuando se conectaba uno de los conductores del circuito de la bobina de inducción a la lámina y la mano que portaba el otro conductor frotaba la superficie metálica, tal como se hacía en el experimento de la bañera, se reproducían con excelente calidad los tonos generados por cada transmisor. El otro receptor consistía en un electroimán y un diafragma metálico. Cuando el electroimán hacía vibrar el diafragma de acuerdo con las frecuencias de la corriente del circuito de la bobina de inducción, se reproducían fielmente los tonos de los transmisores. Los resultados obtenidos sugirieron a Gray tres posibles aplicaciones.

La aplicación más obvia, y quizá la más fácil de perfeccionar, era la que hoy llamaríamos un órgano eléctrico; Gray lo concibió como un "telégrafo musical". Bastaría con construir un teclado que, mediante interruptores, pudiera accionar una serie de transmisores de tonos simples, cada uno de ellos sintonizado a un tono musical diferente. Podría incluso generar acordes pulsando dos o más teclas a la vez.

Otra aplicación, ésta de obvio interés comercial inmediato, se hallaba implícita en la capacidad del hilo telegráfico para transmitir una "corriente compuesta", es decir, constituida por dos, cuatro o un número mayor de frecuencias. ¿Acaso no podría cada tono transmitir una señal telegráfica? El telégrafo musical podría funcionar como un transmisor de señales múltiples, si se dispusiera de un receptor capaz de segregar los distintos tonos de la corriente compuesta. Gray comprobó que ninguno de sus receptores podría serle de utilidad.

Sin embargo, para la tercera aplicación que Gray tenía en mente, el receptor electromagnético era perfectamente adecuado. Si por un hilo podían transmitirse muchas combinaciones de tonos, y posteriormente se reproducía eléctricamente la señal compuesta, ¿por qué no iban a poderse transmitir los sonidos de la voz humana? Gray debió advertir cierta ironía en esta investigación. Si para el sistema ideal de telegrafía múltiplex le faltaba el receptor adecuado, para el de telefonía por corriente compuesta necesitaba el transmisor. Gray no veía cómo resolver el problema del transmisor de voz, aunque inmediatamente concibió un dispositivo sintetizador, bastante complejo, formado por un determinado número de transmisores de tonos simples que correspondieran a los distintos tonos de la voz humana.

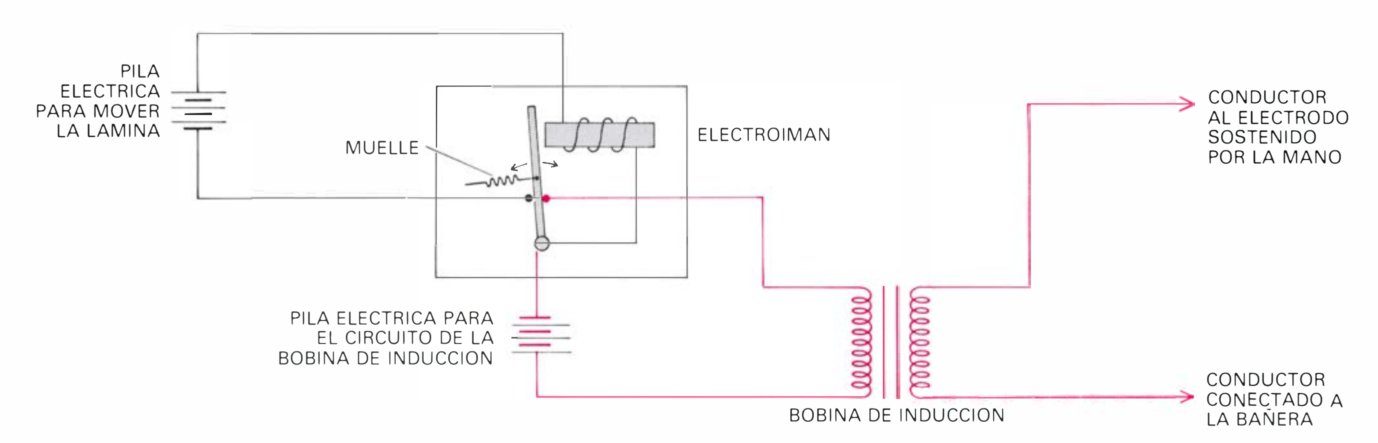
A las pocas semanas del episodio de la bañera, en plena fiebre de actividad experimental, Gray había ya descubierto, y explorado mentalmente, las infinitas posibilidades de utilizar corrientes vibratorias de audiofrecuencia. En mayo de 1874, creyendo haber investigado suficientemente las implicaciones de estas corrientes, presentó sus transmisores y emisores a expertos en telegrafía de las ciudades de Washington, Nueva York y Boston. Los informes que recogen estas demostraciones nos permiten suponer que hizo mención de las tres aplicaciones potenciales de su trabajo: la transmisión de música, mensajes múltiples y voz humana. La gira de Gray desencadenó un aluvión de debates.

Un directivo de la Western Union comentó al *New York Times* que Gray había dado "el primer paso hacia la eliminación de los instrumentos manuales [es decir, el telégrafo a teclado]". "Con el tiempo", continuaba el directivo, "el operador transmitirá por el cable el sonido de su propia voz, y podrá hablar con otra persona en lugar de telegrafiar".

The Telegrapher, principal diario de la industria, tomó el partido contrario. Argumentaba que la transmisión de la voz humana no era nada nuevo, y citaba en apoyo de su tesis un informe que había publicado cinco años antes, en el



DISPOSITIVO RECEPTOR ideado por Gray en 1874 para experimentar las "corrientes vibratorias", que oyó por primera vez en el experimento de la bañera (*véase la ilustración superior de la página opuesta*). Consistía en un violín sin cuerdas, una placa de plata que cubría la caja de resonancia del mismo y un hilo conductor de la bobina de inducción conectado a la placa de plata. La persona que realiza la demostración (aquí Gray) sujeta con la mano el otro conductor y frota con los dedos la superficie metálica. El tono generado reproducía el de su transmisor, una lámina metálica que vibraba a frecuencias audibles.

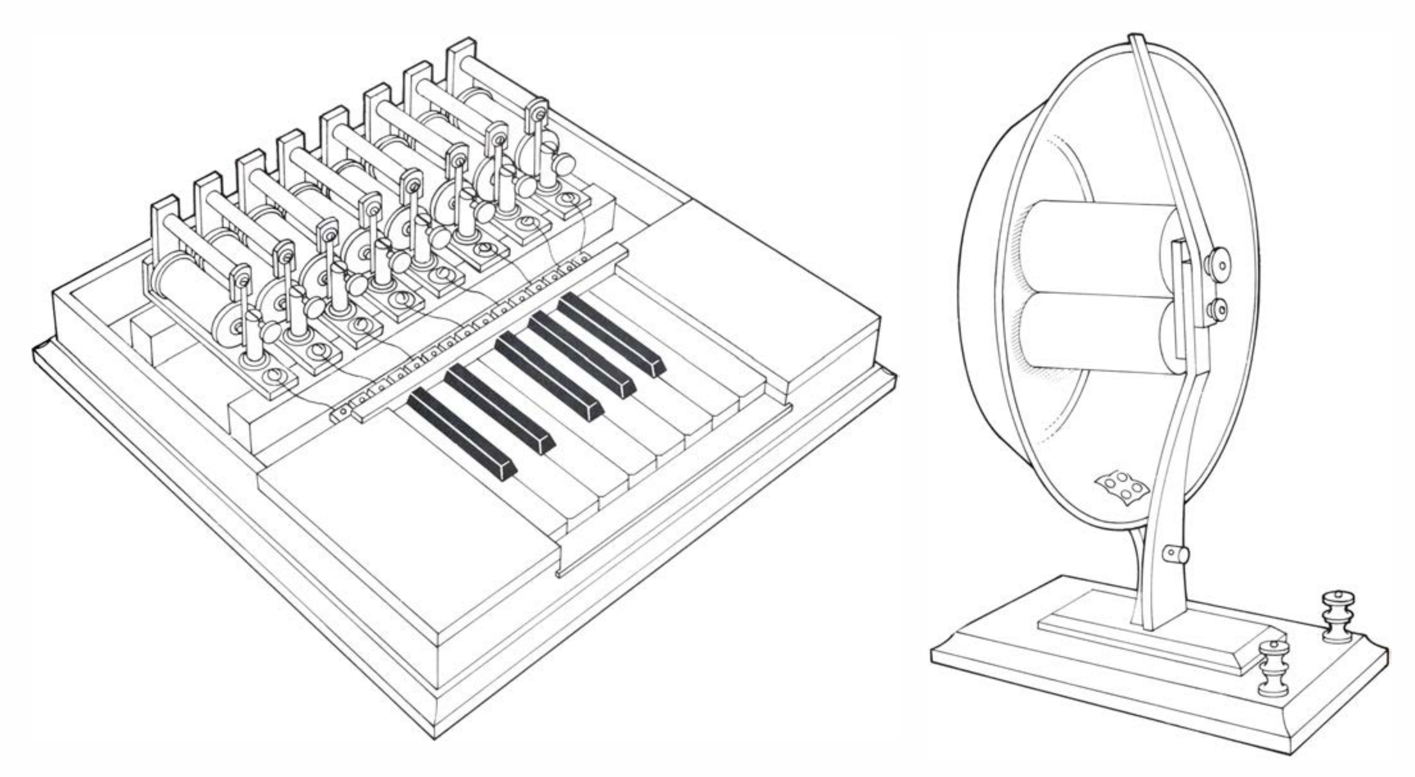


EXPERIMENTO DE LA BAÑERA, basado en un descubrimiento casual del sobrino de Gray en el año 1874. Consta de los circuitos representados en este diagrama. En el lado izquierdo se encuentra el primer circuito, que se abría y cerraba con el movimiento de una lámina metálica, con muelle de fijación, que vibraba a una frecuencia fija. Cuando se cerraba el circuito, se excitaba el electroimán. La respuesta de la lámina a la atracción del núcleo abría el circuito, y la acción del muelle rápidamente lo cerraba de nuevo. Un segundo par de contactos, uno de ellos solidario con la lámina, cerraba y abría simultáneamente el segundo circuito (*en color*). En éste, una bobina de inducción convertía la corriente pulsante en corriente sinusoidal ininterrumpida y de igual frecuencia que la del tono de la lámina. Cuando uno de los conductores de la bobina (*derecha*) se conectaba a la bañera, y el experimentador, a la vez que sujetaba al otro conductor, frotaba su mano sobre la superficie de la bañera, se producía un sonido con idéntico tono que el de la lámina metálica.

que se describía el teléfono de Reis. Johann Reis, un maestro de escuela y experimentador alemán, había acuñado el término "teléfono" para describir un dispositivo de laboratorio construido por él para reproducir música y voz. *The Telegrapher* señalaba que el teléfono de Reis no había demostrado tener una "directa aplicación práctica", quedándose en "mera curiosidad científica".

The Telegrapher recogía también un viejo chiste que corría por los círculos telegráficos a propósito del tema. La historieta era que, en cierta ocasión, se había intentado la comunicación telefónica por línea telegráfica entre Nueva York y Filadelfia, pero hubo que suspenderla debido al fuerte olor a whisky de granel que despedía el aliento de los operadores de Filadelfia. Los puntos de vista que el diario mantenía sobre el teléfono de Reis influyeron y fueron compartidos por A. L. Hayes, uno de los agentes de patentes de Gray, experto a su vez en tecnología eléctrica. Informando a su cliente de las novedades e importancia de los nuevos descubrimientos, llegó a decir que el aparato alemán no era "más que un juguete, que sólo podía funcionar si se manejaba con sumo cuidado, y que no llegaría más allá de un despropósito científico". Reis había muerto hacía ya varios años y el interés por su "curioso dispositivo" había languidecido.

Gray, decepcionado por el descrédito que envolvía el tema de la comunicación telefónica, volvió en el verano de 1874 al desarrollo de las restantes aplicaciones, el telégrafo musical



TRANSMISOR Y RECEPTOR AVANZADOS, dos de los dispositivos que Gray llevó a Inglaterra en el año 1873. El teclado de la izquierda incorpora una serie de transmisores de tonos simples que cubrían el intervalo de una octava. La "palangana" vertical de la izquierda constituía el diafragma del receptor. Un par de electroimanes convertían las "corrientes vibratorias" generadas por el transmisor en vibraciones del diafragma de la palangana.

y el múltiplex. Para la transmisión de música construyó un dispositivo a modo de órgano con un conjunto de transmisores de tonos simples que cubría el intervalo de una octava; posteriormente lo amplió a dos octavas. Para mejorar la calidad del sonido construyó un diafragma mayor sustituyendo la lámina metálica plana por una palangana; desde entonces, tal dispositivo se conoció como el "receptor de palangana".

Durante los meses de agosto y septiembre de 1874, visitó Inglaterra con estos y otros dispositivos. Entre las personas a las que demostró sus inventos se encontraban John Tyndall, sucesor de Michael Faraday en la Royal Institution, y J. Latimer Clark, por aquel entonces quizá la figura más destacada de la telegrafía británica. Gray aprovechó esta visita para comprobar el comportamiento de sus corrientes vibratorias cuando se transmitían por cables submarinos, llegando a la conclusión de que no existían obstáculos técnicos para transformar la telegrafía musical en un sistema de mensajes múltiples. Tanto él como su socio financiero White sabían que ahí les aguardaba el lucro más sustancioso.

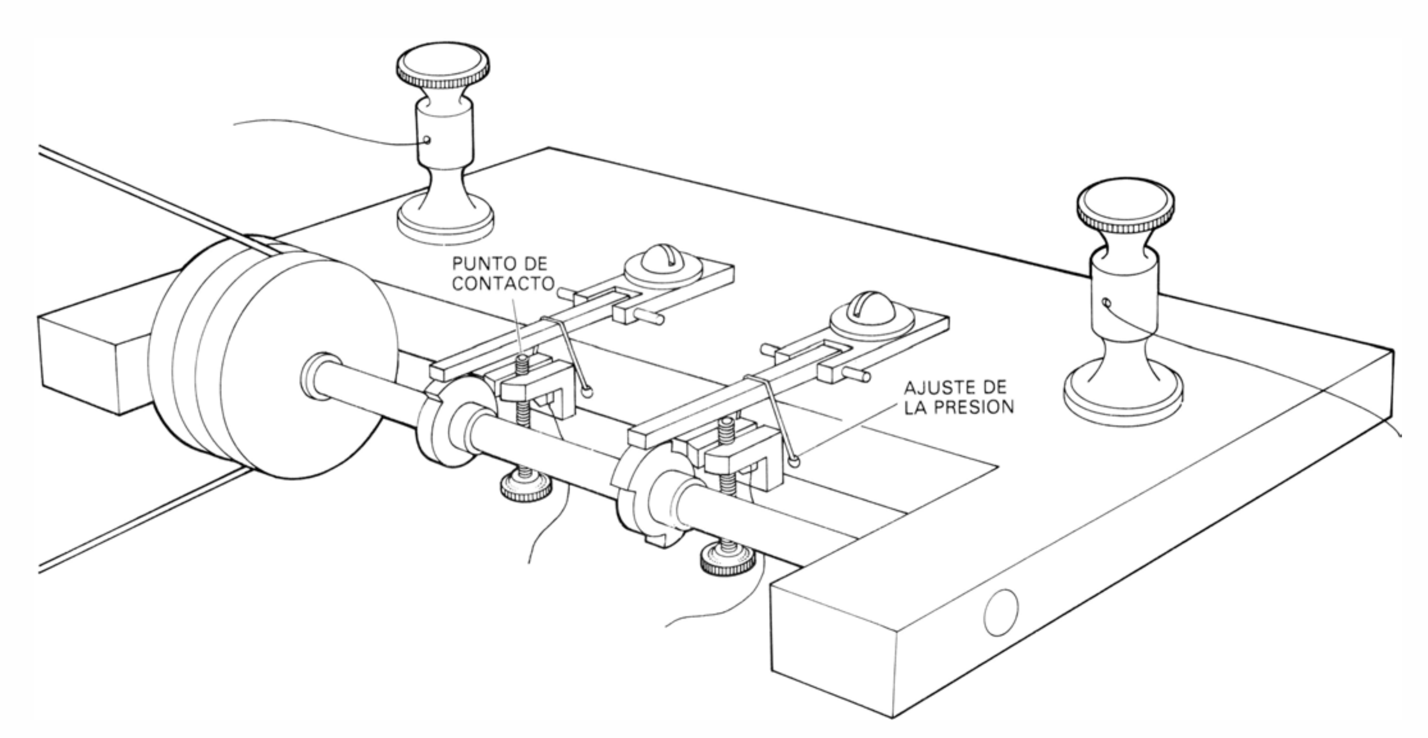
Gray se concentró en el múltiplex en lo que quedaba de aquel año de 1874. En un esfuerzo por aprender más sobre las corrientes de audiofrecuencia, como las llamaríamos hoy, construyó lo que denominó un transmisor "mecánico". Sustituyó la lámina vibratoria por dos levas montadas sobre un eje que giraba a una velocidad igual a las frecuencias de audio, y que abría y cerraba dos juegos de puntos de contacto. También incluyó unos "resortes elásticos" ajustables para regular la presión entre los puntos de contacto.

Cuando ensayó por primera vez su mecanismo, el día de año nuevo de 1875, observó algo totalmente inesperado. Con un solo juego de puntos de contacto en funcionamiento, descubrió, y no era esto lo sorprendente, que el "receptor de palangana" producía tonos cuya frecuencia variaba con la frecuencia del eje de levas. Sin embargo, al ajustar entonces la tensión de los resortes, aumentando o disminuyendo la presión entre los puntos de contacto, descubrió que "podía imitar muchos sonidos [voces] diferentes". De ello concluyó que no se necesitaba el complejo transmisor de la voz que había concebido. Podía construirse un dispositivo bastante más simple para transmitir la voz humana.

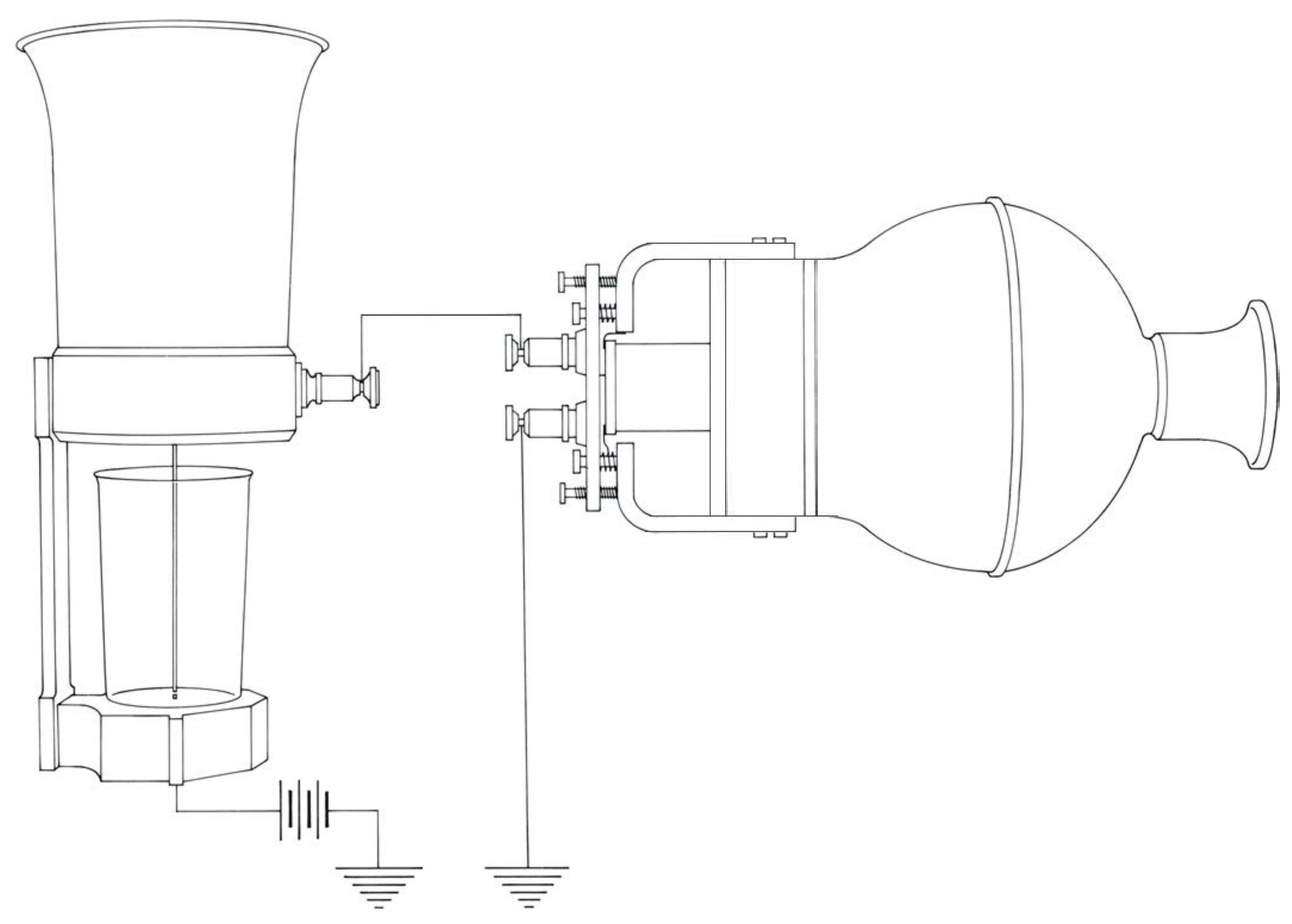
Ni siquiera la perspectiva de un sistema de comunicación de voz sustancialmente mejorado le animó a proseguir en el tema. Prefirió continuar con el desarrollo de un sistema telegráfico múltiplex por parecerle que, a la larga, sería más lucrativo. Su avance firme hacia ese objetivo se evidencia en el número de solicitudes de patente que presentó a comienzos de 1875. Pronto habría de saber que su trabajo iba a entrar en "interferencia", como suele decirse en términos legales, con las solicitudes de patente presentadas por otro inventor. Ese inventor era Alexander Graham Bell.

Contemporáneamente, Bell andaba también afanado en la consecución de un sistema telegráfico múltiplex que trabajara en el espectro de audiofrecuencia (a lo que Gray llamó corrientes vibratorias, Bell lo denominó corrientes ondulatorias). El joven Bell era un aficionado, pero sabía de la fortuna que esperaba al inventor de un sistema industrializable de telegrafía múltiplex. Además, aunque en el terreno de la invención fuera un amateur, Bell era un completo profesional en su propio campo: la elocución y la terapia de la vocalización. Su padre, Alexander M. Bell, profesor de vocalización de la Universidad de Edimburgo, había ganado prestigio internacional por su sistema de enseñar a hablar a los sordos, y su hijo tenía un profundo conocimiento de la fisiología de la voz humana. En efecto, por aquel entonces, ya había publicado una teoría sobre los tonos de las vocales.

Este trabajo adquirió cierta resonancia. Y así, un prominente fonetista británico, Alexander J. Ellis, que había tenido noticia de la teoría de Bell, le indicó que esa misma teoría había sido adelantada en una obra clásica: "Sobre la sensación de los tonos como base fi-



SUSTITUTIVO DE LAS LAMINAS METALICAS, ideado por Gray a finales de 1874. Consistía en un árbol de levas con correa de transmisión. Dos levas abrían y cerraban dos juegos de puntos de contacto y unos resortes permitían ajustar la presión de los mismos. El 1 de enero de 1875, probando su "transmisor mecánico" en el rango de las audiofrecuencias, Gray descubrió que, al variar la presión de los puntos de contacto, se alteraba la corriente pulsante de salida en tal sentido que su receptor de "palangana" emitía diversos sonidos vocales: un dispositivo simple podría transmitir la voz.



TELEFONO DE GRAY, tal como lo presentó a la Oficina de Patentes el 14 de febrero de 1876 bajo la solicitud de "inscripción provisional". Pocas diferencias existen con respecto al dispositivo que había dibujado tres días antes. Las ligeras variaciones de corriente producidas por el movimiento del diafragma transmisor (*a la izquierda*) se convertían, por efecto del electroimán, en vibraciones del diafragma receptor. Aunque Gray podría haber recurrido contra la solicitud de patente de Bell, cumplimentada horas antes en el mismo día, aceptó los consejos de su asesor de patentes y acabó por abandonar el asunto.

siológica para la Teoría de la Música", del sabio alemán Hermann von Helmholtz. Ellis también señaló a Bell el uso que Helmholtz había dado, en muchos de sus experimentos, al diapasón excitado eléctricamente. Bell adquirió una versión francesa del libro de Helmholtz y la leyó en 1870 durante su viaje de Inglaterra a América.

Cuando Bell se estableció en Boston, en el año 1871, para enseñar en la Escuela de Sordomudos, halló que los trabajos acústicos de Helmholtz eran conocidos entre sus colegas. Se contaba, entre ellos, Lewis Monroe, un amigo de la familia Bell y profesor de vocalización en el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Monroe comentó a Bell que en el MIT disponían de aparatos experimentales del mismo tipo que los utilizados por Helmholtz, y le propuso repetir el experimento. También prestó a Bell una copia de un reciente libro de Tyndall sobre acústica. Bell pronto se puso en contacto con otras personas interesadas en investigaciones sobre el sonido: Charles R. Cross, ayudante del físico Edward C. Pickering, del MIT, y el doctor Clarence J. Blake, de Boston, profesor de otología de la Facultad de Medicina de Harvard.

Aunque fueron acústicos los antecedentes del trabajo que sobre el teléfono realizó Bell, el paso inmediato hacia ese objetivo tuvo que ver, al igual que en Gray, con el telégrafo múltiplex. Bell decidió dedicarse al múltiplex a finales de 1872, a raíz de la lectura, en un periódico de Boston, de un informe sobre la adopción, por parte de la Western Union, del sistema dúplex de Stearns. Si Stearns se había hecho rico con un sistema que sólo podía transmitir simultáneamente dos mensajes, y en sentidos opuestos, ¿qué fortuna no esperaría al hombre que inventara un sistema de mayor capacidad?

Los aparatos de Helmholtz significaron para Bell el punto de partida. El científico germano había ideado un sistema de generar corrientes intermitentes de audiofrecuencia en el que el extremo vibrante del estilete de un diapasón hacía de interruptor. Aprovechaba la corriente intermitente para actuar sobre otros diapasones. Bell vio en ese método una manera de transmitir mensajes múltiples. Si se sintonizaban a diferentes frecuencias varios interruptores de tipo Helmholtz a base de diapasones, cada interruptor podría transmitir un mensaje diferente. Este esquema llevó a Bell hasta el mismo problema con que se había enfrentado Gray: idear un receptor que pudiera separar los mensajes combinados. Pero Bell se movía en un medio más extraño que lo hiciera Gray. Tenía que averiguar si podían transmitirse tonos compuestos por cable.

Desde finales del año 1872, y hasta las postrimerías del siguiente, Bell trabajó de un modo intermitente en su esquema de telgrafía múltiplex. A diferencia de Gray, quien contrató a un fabricante de instrumentos profesionales, Bell construía él mismo su aparato. Su escasa destreza mecánica le llevó a fabricar un dispositivo tosco. Así, al principio, no pudo montar un interruptor

Helmholtz que funcionara más de unos pocos segundos. Que era un aficionado en la materia estaba muy claro en todos los sentidos.

A finales de la primavera de 1874, se enteró de los trabajos de Gray sobre corrientes vibratorias. Inmediatamente aceleró la marcha del suyo propio. Hasta entonces, los esfuerzos de Bell apenas habían tenido éxito alguno, pero la fe en su esquema múltiplex no decaía. Esa confianza se hubiera tambaleado, no obstante, de no haber encontrado la compañía de G. Hubbard, un entusiasta de la telegrafía. Hubbard había contratado a Bell como profesor de su hija, que había quedado muda a consecuencia de la escarlatina. Según Hubbard, la Western Union era una amenaza para el progreso de la telegrafía, pues el monopolio frenaba la innovación. Naturalmente, los dos hablaron sobre telegrafía y, en octubre de 1874, Bell reveló que estaba trabajando en un esquema múltiplex. Hubbard había predicho, incluso antes de conocer a Bell, que "con el tiempo, podría utilizarse un hilo para cuatro o tal vez ocho mensajes". Le pasó una subvención suficiente como para contratar a un experto en temas eléctricos y pagar los servicios de un diestro fabricante de instrumentos. Aunque no tardó en mejorar la calidad de los aparatos de Bell, la ayuda más importante que Hubbard ofreció a su socio fue, sin duda, alentar a Bell en su proyecto prioritario de la telegrafía múltiplex.

En el verano de 1875 fueron los propios resultados los que le convencieron de la posibilidad de transmitir la voz, conclusión idéntica a la que había llegado Gray un poco antes en ese mismo año. Este, empero, había descartado la idea en favor de un trabajo más profundo sobre la telegrafía múltiplex; no así Bell, cuyo fuerte interés por la voz le persuadió de que tal logro sería de primerísima importancia. Como Gray, Bell había pensado en un principio en un transmisor de voz complejo. Mas la experimentación con transmisores y receptores de láminas de acero sintonizadas le despertó la idea de un dispositivo para ambos propósitos, que consistía básicamente en una lámina sujeta al centro de un diafragma. Transmisor y receptor se colocaban próximos a uno de los polos de un electroimán, cuyo núcleo estaba ligeramente magnetizado.

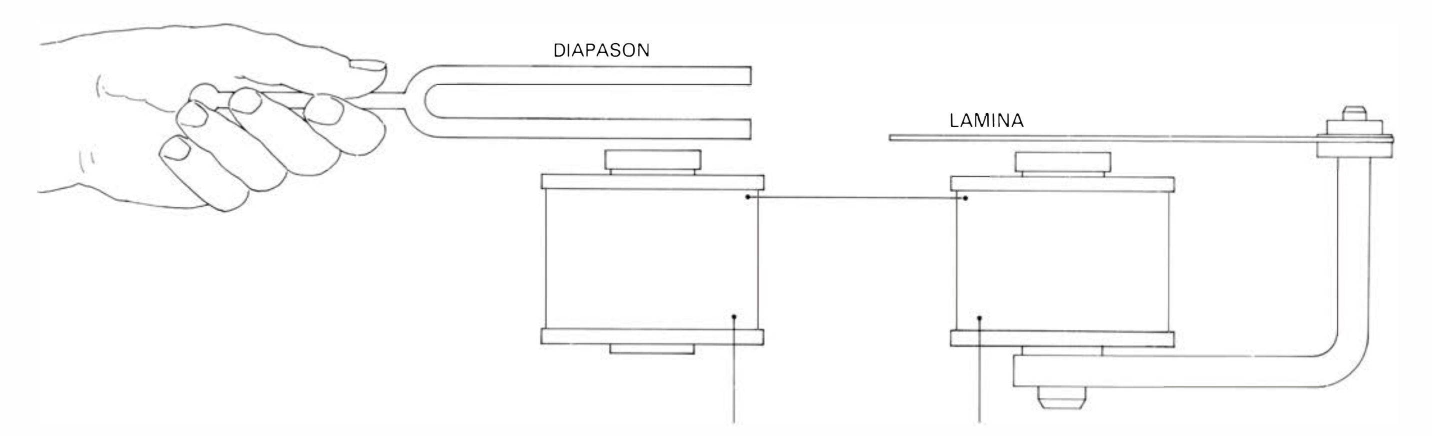
Con este par de dispositivos, el primero de julio de 1875 Bell y su ayudante consiguieron transmitir y recibir lo que él describió como "sonidos vocales". Estos sonidos, sin embargo, no correspondían al habla. El sistema requería que Bell, o su ayudante, gritaran sobre el diafragma del dispositivo transmisor. Las ondas sonoras movían el diafragma y éste hacía que la lámina vibrase. Tal movimiento generaba una débil "corriente ondulatoria" en el electroimán transmisor, que, al actuar sobre el electroimán receptor, determinaba que su diafragma reprodujera los movimientos correspondientes al diafragma del transmisor.

Bell estaba fascinado con las posibilidades que ofrecían estos dispositivos. (No hemos de olvidar que los primeros teléfonos comerciales que aparecieron en 1877 eran versiones, mejoradas, de los dispositivos de imán y diafragma de 1875.) Pero a Hubbard eso le dejaba sin cuidado; al igual que Gray y su socio financiero, sus esperanzas seguían depositadas en la telegrafía múltiplex.

Por esas fechas, Gray y Bell jugaban ya al gato y al ratón. Sospechaban un mutuo espionaje, los dos creían que su propio trabajo era el más avanzado y a la vez temían que el rival consiguiera el despegue definitivo. Andando el tiempo, Gray dedujo que los esfuerzos de Bell no iban por buen camino. En octubre de 1875 escribía a su agente de patentes: "parece que Bell está dedicando todas sus energías al telégrafo parlante. Aun reconociendo su interés científico, carece por ahora de valor comercial y [la industria telegráfica] puede obtener mayores beneficios explotando las líneas con métodos convencionales que con ese sistema. Y en este momento no estoy para perder tiempo y dinero en algo que no me reportaría beneficio alguno".

Pese a todo, cuando ese mismo mes Gray acertó a ver a dos chicos divirtiéndose con un juguete casero denominado "telégrafo de los enamorados", intuyó de inmediato cómo se podría construir un teléfono eléctrico. El telégrafo de los enamorados es lo que en nuestros días llamaríamos "teléfono de bote". Dos botes sin tapa se conectan con un hilo anudado en el interior de un orificio practicado en el fondo de cada bote. Cuando se estira y tensa el hilo, los sonidos articulados en uno de los botes hacen vibrar el fondo del mismo; esas vibraciones se transmiten por la cuerda tensada hasta el fondo del otro bote y se reproducen burdamente los sonidos originales.

Gray reconoció el símil eléctrico del juguete. El transmisor eléctrico constaría de una cavidad acústica (el bote) y de un diafragma (el fondo del bote). Si el extremo de un conductor se conectaba al diafragma y el otro se sumergía en



LOS EXPERIMENTOS DE BELL, realizados urgentemente después de que hubiera cumplimentado la solicitud de patente, incluían en algún caso (tal como el aquí ilustrado) el uso de electroimanes en ambos dispositivos: transmisor y receptor. Bell ya había intentado en 1875, aunque sin éxito, una realización similar. Hasta que no logró transmitir la voz humana por medio de un dispositivo de resistencia variable no volvió al sistema transmisor-receptor electromagnético. En la figura, la vibración de un diapasón próximo al electroimán de la izquierda producía fluctuaciones en su campo magnético. Estas fluctuaciones originaban, a su vez, variaciones de corriente y, por tanto, del campo magnético del electroimán de la derecha. Consecuentemente, la lámina metálica situada en la parte superior vibraba a la misma frecuencia que la del diapasón. Una versión más avanzada de este transmisor–receptor fue el sistema que Bell exhibió en junio de 1876 en la Exposición Centenario de Filadelfia, utilizado en el primer teléfono comercial en 1877.

... 174,537	Table, ironing, J. V. Six...........................	174,385
... 174,490	Tailor's drafting apparatus, P. Roudel...........	174,443
... 174,471	Tank filler, automatic, A. Haerle....	174,420
... 174,502	Teapot handle, J. A. Graff	174,520
. . 174,474	Telegraphy, A. G. Bell	174,465
... 174,586	Tether, S. L. Boyles..................................	174,407
... 174,559	Thill coupling, W. H. Cornell......................	174,413
... 174,582	Thrashing machines, spike for, C. Wilde	174,453

WAN
Po
Stationary
about as g

INDEX
CHINE
number of

LA PATENTE 174.465 fue una de las 270 concedidas por la Oficina de Patentes de los Estados Unidos el 7 de marzo de 1876, tres semanas después de que Bell hubiera cumplimentado su solicitud de patente para el teléfono. Esta "nota oficial" fue publicada por SCIENTIFIC AMERICAN el 8 de abril de 1876.

un líquido de alta resistencia eléctrica, el movimiento del hilo en respuesta a las vibraciones del diafragma podría transformarse en una corriente vibratoria que reprodujera fielmente las diversas frecuencias de la voz. Por otro lado, Gray ya sabía que su receptor electromagnético podía reconvertir las corrientes vibratorias en ondas sonoras.

Aunque E. Gray pensaba que el dispositivo carecía de aplicación comercial, decidió que merecía la pena intentar patentarlo. Ya sabía que el movimiento de un conductor en un líquido producía vibraciones en una corriente eléctrica. Siendo aún copropietario de la Western Electric, ésta fabricaba y vendía reostatos líquidos, dispositivos que variaban la resistencia de un circuito regulando la profundidad a la que una varilla se sumergía en un líquido de alta resistencia eléctrica. Su intenso trabajo absorbente en el múltiplex telegráfico le hizo posponer tres meses la decisión de registrar la patente. Por último, en febrero de 1876, plasmó sus ideas sobre papel. Pero ni siquiera entonces solicitó la patente; lo entregó en la sección llamada de "caveat", suerte de "inscripción provisional".

La inscripción provisional suponía, por parte del inventor, presentar en la Oficina de Patentes la notificación formal de un concepto básico. Rellenada la inscripción provisional, el inventor debía transformar la idea en un dispositivo operativo y solicitar posteriormente la correspondiente patente. Este procedimiento pretendía dar cierta protección a las ideas de los inventores. En esta ocasión, el agente de patentes de Gray comunicó al socio financiero de éste que la inscripción provisional sobre el "telégrafo parlante" podría interferir una solicitud de patente presentada por Bell, pues "la inscripción provisional de Gray se hizo el mismo día, pero más tarde, que la solicitud de Bell". Según el agente, "el comisario sostiene que no ha lugar a interferencia y se ha ordenado registrar la solicitud de Bell... Todavía podríamos lograr una interferencia si mañana viniese Gray y cumplimentase rápidamente una solicitud de patente. Si desea que se haga así, telegrafíeme por la mañana al recibir este escrito y tendré los papeles preparados a tiempo para suspender el registro de la patente de Bell, aunque mi opinión es contraria a que iniciemos este recurso".

Casualmente, cuando la carta llegó a manos de White, estaba allí de visita el inventor. White presionó firmemente para que Gray se concentrase en la telegrafía múltiplex. Por otro lado, su propio agente de patentes se había pronunciado en contra de interponer recurso. En vista de lo anterior, Gray decidió abandonar el asunto. Se dejaba el teléfono para Alexander Graham Bell.

Los expertos en telegrafía, Gray incluido, habían llegado a la conclusión de que no merecía la pena prestar mayor atención al teléfono. Bell continuaba inmutable en su convencimiento de que dar con un teléfono viable sería un hallazgo de importancia capital. La mayoría de los borradores que estaba preparando para solicitar patentes trataban de los dispositivos experimentados en julio de 1875 (lo que llegó a conocerse como el "teléfono electromagnético"). No obstante, al final presentó la descripción de un tipo de transmisor diferente.

En ella escribía: "las ondulaciones eléctricas pueden también producirse aumentando y disminuyendo, alternativamente, la resistencia eléctrica de un circuito... Por ejemplo, hagamos que el mercurio u otro líquido forme parte de un circuito voltaico. Entonces, cuanto más sumergido esté el conductor en el líquido, menor será la resistencia que el líquido ofrecerá al paso de la corriente. En consecuencia, la vibración del hilo conductor inmerso en un líquido que forme parte del circuito ocasionará ondulaciones en la corriente".

Evidentemente, Bell había juzgado mal las propiedades eléctricas del mercurio. Es un líquido de baja resistencia, no de alta. Resulta desconcertante que cometiera semejante error después de haber leído los escritos de Helmholtz sobre las propiedades eléctricas del mercurio; es obvio que debería estar familiarizado con las mismas. Ni está claro tampoco cómo concibió el transmisor de resistencia variable, es decir, con qué precedentes contó. Persisten las dudas sobre cómo y cuándo logró incluir el párrafo descriptivo en la especificación definitiva de la patente. Cabe preguntarse, por último, cuál fue el motivo que le indujo a rellenar una solicitud de patente y no una "inscripción provisional". Según las leyes sobre patentes, sus ideas no se habían materializado en un dispositivo, hecho que había pasado por alto o ignorado la Oficina de Patentes. Estas cuestiones han sido fuente de especulación durante más de un siglo, y no requieren que nos detengamos en ellas aquí.

En junio de 1876, Gray asistió a una demostración que Bell hiciera de su teléfono en la Exposición Centenario de Filadelfia. Comentaría luego a uno de sus miembros que "el telégrafo parlante de Bell sólo crea interés en círculos científicos y su valor comercial será limitado". De esta manera, Gray, un inventor profesional, continuaba minusvalorando la importancia del teléfono, a pesar de que su realización era ya un éxito. Por contra, Bell, un inventor aficionado, dos semanas después de haber cumplimentado la solicitud de patente (y casi dos semanas antes de ser el primero en escuchar la voz humana a través de su dispositivo), escribía a su padre: "*El asunto es todo mío,* y estoy seguro de alcanzar fama, fortuna y éxito".

Temas metamágicos

La nueva pluma de la sección toma raudo vuelo en un medio autoalusivo

Douglas R. Hofstadter

Nunca conté con verme escribiendo una sección fija de *Investigación y Ciencia.* Tengo que decir cuanto antes que no estoy aquí para reemplazar a Martin Gardner. Nadie podría hacerlo. Empero, Martin se propone jubilarse a finales de año, y hasta entonces, él y yo compartiremos la sección.

Sé que hace años deseé seguir sus pasos. Me parecía apasionante poder sumergirme en prácticamente cualquier tema de mi agrado y exponer cosas amenas e instructivas, relacionadas entre sí, a un público amplio, culto y receptivo. La posibilidad de hacer algo así parecía ideal, casi de ensueño.

A lo largo de los años siguientes, por una serie de completas coincidencias (que luego resultaron no ser tan completas) fui conociendo, uno tras otro, a los amigos de Martin. Primero fue Ray Hyman, un psicólogo especializado en el estudio de ilusiones. Hyman me presentó al ilusionista Jerry Andrus. Conocí después al estadístico, y también ilusionista, Persi Diaconis, y al mago de la computadora, Bill Gosper. Vinieron luego Scott Kim y, algo más tarde, el matemático Benoît Mandelbrot. De pronto, el mundo parecía girar en torno a Martin Gardner. Martin ocupaba el cubo de una rueda mágica, de personas llenas de ideas nuevas, apasionantes, con frecuencia heterodoxas, de personas cuya imaginación tiene más de tres dimensiones. A veces me he sentido amedrentado por lo sobresaliente del grupo en su conjunto.

Un día, hace ya varios años, tuve el placer de pasar horas con Martin, en su casa, analizando y discurriendo sobre muchos temas, matemáticos o no. Fue para mí una experiencia reveladora, que me permitió ver desde nuevo enfoque la mente de un hombre que ya había contribuido mucho a mi propia formación matemática. Quizá lo que más me sorprendió de Martin fue su natural sencillez. Me habían dicho que era ilusionista muy diestro. Cuesta creerlo, pues no es fácil imaginarle tendiendo velos ante los ojos de nadie.

No le vi entonces realizar ningún truco mágico. Lo que vi, sencillamente, fue extenderse ante mí su vasto conocimiento y su amor por las ideas, sin la menor traza de orgullo o fingimiento. Los Gardner, Martin y su esposa Charlotte, me agasajaron todo el día. Almorzamos en la cocina de su acogedora casa de tres plantas. Me agradó ver que no había prácticamente trazas de matemáticas, juegos o trucos en su sencilla pero encantadora sala de estar.

Después del almuerzo subimos los dos vuelos de escalera que llevan al refugio de Martin. La vieja máquina de escribir y su legendario archivo de fichas de 8 por 13 me hicieron pensar en un periodista de vieja escuela y no en el centro de una constelación de matemáticos excéntricos y juego-adictos, por no mencionar magos, ilusionistas, anticultistas y, por supuesto, los miles de lectores de su sección.

De vez en cuando nos interrumpía el tintineo de una campanilla que, guiada por un cordón, a través del hueco de la escalera, conectaba con la cocina, desde donde su esposa podía avisarle o llamarle. Se recibieron un par de llamadas telefónicas, una de ellas del lógico e ilusionista Raymond Smullyan, otra de las personas que yo conocía bien por reputación, pero que ignoraba perteneciese también a este círculo encantado. Fue un día extraordinariamente grato.

El número de Martin –como ellos lo llaman– será difícil de continuar. No me propongo, sin embargo, ser otro Martin Gardner. Yo tengo mis propios temas de interés personal, y nadie, excepto Martin en persona, podría tener todos los suyos. Mas, para expresar a Martin mi deuda, y para simbolizar el legado de su sección, he conservado (en lo posible) su título, "Juegos matemáticos" en forma de anagrama: "Temas metamágicos".

¿Qué significado puede tener "metamágico"? Para mí, quiere decir "lo situado un nivel más allá de lo mágico". Tenemos aquí una ambigüedad: por una parte, la palabra podría significar "ultramágico", mágico de orden superior; mas, por otra parte, lo mágico de la magia es que lo situado tras ella es siempre de carácter no mágico. ¡Esto va a ser la metamagia para ustedes! La idea refleja el conocido pero vigoroso adagio "La verdad es más extraña que la ficción". Por ello, mis temas de metamagia mostrarán, a la manera gardneriana, cuán frecuente es que la magia nos aceche desde donde menos se espera, y por la razón contraria, cómo pocas veces se presenta donde muchos la creen ver. Y dicho esto, me lanzo por mí mismo.

En su sección del mes de septiembre de 1979, Martin dio una benévola recensión de mi libro *Gödel, Escher, Bach: An Eternal Golden Braid.* Su comentario comenzaba con una breve cita de mi libro. Si me hubiesen pedido que adivinase la única frase de mi libro que iba a ser elegida, nunca hubiera atinado. Martin espumó la oración: "Esta frase no verbo". La frase tiene gancho, pero al volver a verla algo me molestó. Recuerdo haberla escrito un día, tratando de dar con una versión nueva de un tema viejo, mas no me resultó tan chocante como yo esperaba. Viéndola elegida como emblema de mi libro me sentí retado. Me dije que sin duda tendría que haber otros tipos de frases autoalusivas de mucho más agudo filo. Anoté unas cuantas y las mostré a los amigos, despertando así una locura benigna, aunque contagiosa, en un pequeño grupo de personas. Presentaré la que considero flor de esa cosecha.

No sería correcto continuar sin antes aclarar el término "autoalusión". La autoalusión es ubicua, y se da cada vez que una persona dice "yo", o "a mí", o "palabra", o "hablar", o "boca". Hay autoalusión cada vez que un periódico publica noticias sobre periodistas, cada vez que se escribe un libro sobre el arte de escribir, se diseña una revista sobre maquetismo, se rueda una película sobre la filmación de películas, o se escribe un artículo sobre autoalusión. Muchos sistemas tienen capacidad para referirse a sí mismos, o representarse a sí mismos, para designarse a sí mismos o a elementos de sí mismos, con los términos del sistema de su propio simbolismo. Cada vez que así sucede tenemos un caso de autoalusión.

Con frecuencia se comete el error de confundir la autoalusión con la paradoja, probablemente, porque el primer ejemplo famoso de proposición autoalusiva ha sido la paradoja de Epiménides. El cretense Epiménides afirmó: "Todos los cretenses son mentirosos". Supongo que nadie podría decirnos hoy si al pronunciar esta frase Epiménides

había olvidado que su origen invalidaba su declaración, o si ésta era justamente su intención. Sea como fuere, dos frases descendientes de aquélla son conocidas hoy por "paradoja de Epiménides", las frases "Yo estoy mintiendo" y "Esta proposición es falsa", conocidas también por "paradoja del mentiroso". Ambas frases son pequeñas joyas, radicalmente autodestructivas, y durante muchos siglos han dado mala fama a las frases autoalusivas. Cuando se habla de los peligros de la autoalusión suele olvidarse que al usar el pronombre "yo" no siempre se produce una paradoja.

Sirvámonos de la paradoja de Epiménides como trampolín con que saltar a este fascinante territorio. La creación de frases que de una u otra forma se invalidan a sí mismas es tema que admite muchas variaciones. Examinemos estas dos:

"Esta frase declara ser una paradoja de Epiménides, pero está mintiendo".

"Esta frase se contradice a sí misma, aunque, bueno, ¡la verdad es que no se contradice!".

¿Qué deberemos hacer si nos dicen "¡Desobedezca esta orden!"? En la frase que sigue su cualidad "cretense" sólo queda clara tras un instante de atención: "Esta oracción contiene tres erores". También aquí hay un delicioso efecto de "culatazo".

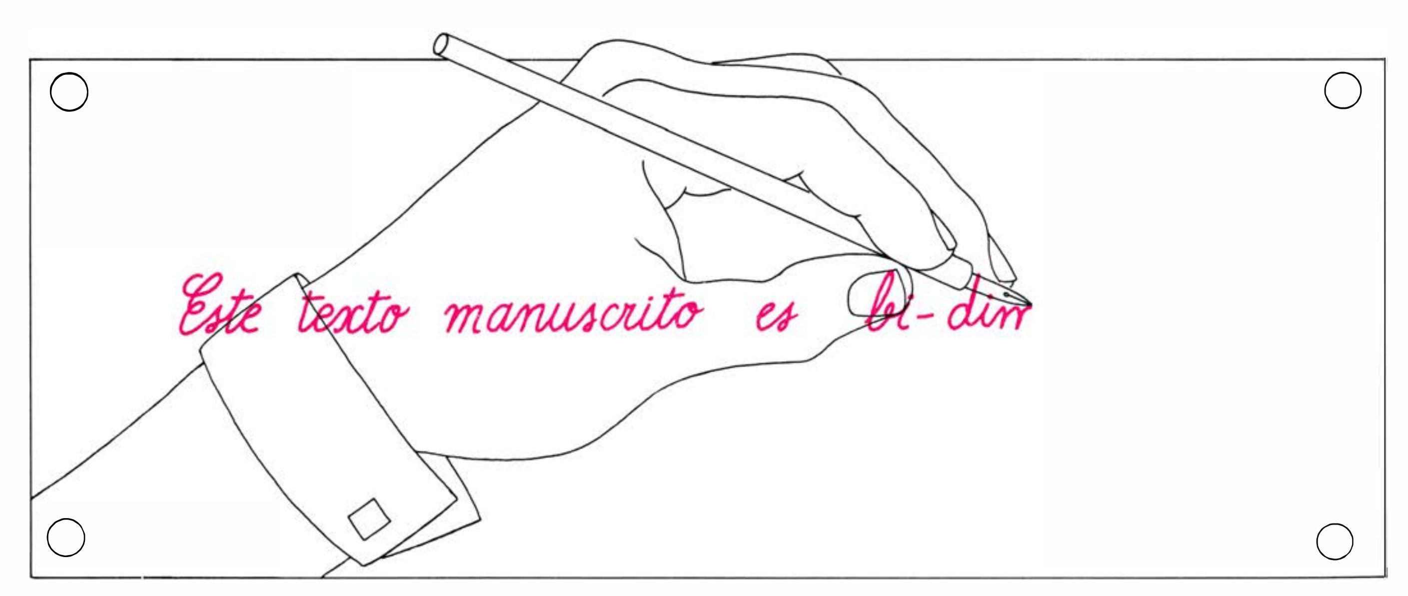
El famoso teorema de Kurt Gödel sobre incompletitud de la metamatemática puede considerarse surgido de su intento de reproducir tan fielmente como fuera posible la paradoja del mentiroso en forma estrictamente matemática. Con maravilloso ingenio consiguió demostrar que en todo sistema axiomático *S* de cierta potencia matemática es posible expresar un pariente cercano de la paradoja del mentiroso, a saber, "Esta fórmula es indemostrable en el seno del sistema axiomático *S*".

En realidad, la construcción de Gödel produce una fórmula matemática, y no una frase en español; he traducido la fórmula a nuestro idioma para dar idea de su intención. Los astutos lectores habrán sin duda observado que estrictamente hablando, la frase "esta fórmula" carece de referente, pues la versión castellana ¡no es ya una fórmula!

Persistiendo en esta idea, descubriremos que conduce a un grandioso espacio. De aquí, la siguiente y breve digresión sobre la preservación de la autoalusión a través de las fronteras lingüísticas. ¿Cómo deberíamos traducir la frase francesa "Cette phrase en français est difficile à traduire en espagnol"? Aunque no supiéramos una palabra de francés podríamos comprender el problema a través de una traducción: "Esta frase en francés es difícil de traducir al español". ¿A qué alude el sujeto de esta última frase? Si se refiere a la frase en español el sujeto entra en contradicción consigo mismo, y la frase en español sería falsa (mientras que la original francesa sería verdadera e inofensiva); pero si alude a la frase en francés, al traducir se ha perdido su carácter autoalusivo. Algo muy inquietante sucede en cualquier caso, y hay que señalar que no resultaría menos inquietante traduciendo "Esta frase en español es difícil de traducir al francés", si bien nuestra desazón tendría ahora causa distinta. El lector habrá sin duda visto películas cuya trama se desarrolla en Francia, en las que todo el diálogo, exceptuando algún inofensivo "Bon jour", o frase similar, discurre en español. ¿Qué hacer cuando el Cardenal Richelieu desea felicitar al barón alemán por un excelente dominio del francés? Supongo que la solución más elegante sería decir "Mostráis un excelente dominio de nuestro idioma, mon cher baron", y dejar así las cosas.

Mas abandonemos nuestra digresión, y retornando a la fórmula de Gödel, concentremos la atención en su significado. Observemos que la noción de falsedad ha sido decantada en otra, más fácil de manejar rigurosamente: la noción de demostrabilidad. El lógico Alfred Tarski hizo notar que en principio es imposible traducir exactamente la paradoja del mentiroso a ningún lenguaje matemático riguroso, pues si ello fuera posible las matemáticas contendrían una genuina paradoja –un enunciado simultáneamente verdadero y falso– y caerían por tierra de extremo a extremo.

Por otra parte, el enunciado de Gödel se acerca lo bastante a la paradoja como para poner los pelos de punta, pero no es una paradoja. Resulta ser verdadera, y por ello es indemostrable en el sistema axiomático. La revelación que nos hace el trabajo de Gödel es que en cualquier sistema axiomático coherente y de suficiente potencia matemática pueden construirse mediante autoalusión una infinidad de fórmulas verdaderas, pero indemostrables, poniendo así de manifiesto que por alguna razón la plena potencia del pensamiento matemático de los humanos consigue eludir ser apresado en la cárcel del rigor. Analizando la demostración de Gödel, el filósofo W. Quine inventó la siguiente forma de explicar cómo podría lograrse la autoalusión en el magro lenguaje formal que Gödel estaba utilizando. La construcción de Quine proporciona un nuevo método para enunciar la paradoja del mentiroso. Héla aquí:



Dibujo autoalusivo de una sentencia autoalusiva ("Este texto manuscrito es bi-dimensional")

" 'produce falsedad al agregarla tras su referencia'. produce falsedad al agregarla tras su referencia."

La frase describe un método para construir una cierta entidad tipográfica, a saber, una frase añadida como apéndice a una copia entrecomillada de sí misma. Empero, cuando la construcción se lleva a cabo vemos que el producto final es la propia frase. (Hay aquí cierto parecido con la autoduplicación que manifiestan las células vivas.) La frase afirma la falsedad de la entidad tipográfica así construida, es decir, la falsedad de sí misma (o de una copia de sí misma indistinguible de la original). Disponemos, así pues, de una versión menos compacta, aunque más explícita de la paradoja de Epiménides.

Parece ser que en todas las paradojas interviene, de una forma u otra, la autoalusión, ya sea directa o indirectamente. Y puesto que el honor del descubrimiento –o la creación– de la autoalusión ha sido atribuido a Epiménides el cretense, podríamos decir: "Tras cada paradoja que logra éxito se oculta un cretense".

Inspirándonos en la sagaz construcción de Quine podemos crear una pregunta autoalusiva:

"¿Qué tal es ser preguntado, '¿Qué tal es ser preguntado, autoinmerso entre comillas tras de su coma?' autoinmerso entre comillas tras de su coma?"

Volvemos aquí a pedirle al lector que construya una entidad tipográfica que, una vez hayan sido ejecutadas las operaciones pertinentes, resulte idéntica al conjunto de instrucciones. Esta pregunta autoalusiva sugiere el siguiente rompecabezas: ¿Qué es una pregunta que puede servir como respuesta de sí misma? Los lectores podrían entretenerse en buscar diversas soluciones a este problema.

Cuando las palabras se utilizan para aludir a otros seres u objetos se dice que "se usan". En cambio, cuando una palabra se está citando con ánimo de examinarla en sus aspectos lingüísticos, se dice que la palabra "se menciona". Las frases que siguen están inspiradas en esta clásica distinción entre uso y mención.

"No puedes tener tu uso y mencionarlo también."

"No puedes tomar 'tu pastel' y deletrearlo 'también.' "

"'Los juegos de palabras con la distinción entre uso y mención' no son 'lo más importante del mundo', entérese usted."

"Para poder comprender 'esta frase' tendrá usted que suprimir las comillas que hay en 'en ella'."

"Aquí tiene una frase con 'cebolla', 'lechuga', 'tomate' y 'guarnición de patatas fritas a juego.' "

"Tenemos aquí una hamburguesa con vocales, consonantes, comas y un punto al final."

Las dos últimas expresan humorísticamente la misma idea. He aquí dos casos bastante extremos de juegos de palabras "uso-mención" autoalusivos:

"Adoptaremos un nuevo convenio, a saber, que todo texto encerrado en triples comillas, por ejemplo, '''No, he optado por cambiar la opinión; al cerrarse las triples comillas salte directamente hasta el punto y haga caso omiso de todo cuanto le anteceda''', ni siquiera debe ser leído (y mucho menos, prestarle atención u obediencia)."

"À ceux qui ne comprennent pas l'espagnol, la phrase citée ci-dessous ne dit rien: 'Para quienes no entienden el francés, la frase francesa que sirve de preámbulo a esta frase entrecomillada carece de significado.' "

Este ejemplo bilingüe sería aún más efectivo si sólo se comprendiera uno de los dos idiomas que intervienen en él. Finalmente, examinemos la siguiente anomalía de carácter uso-mención:

"yo debería haber empezado por mayúscula."

Se trata de una frase que alude a sí misma por intermedio del (achicado) pronombre personal "Yo", en lugar de hacerlo a través de alguna perífrasis demostrativa como "esta frase"; de hacerlo así, la oración parecería estar declarándose, altivamente, dotada de entendimiento. Otro ejemplo podríamos tenerlo con "Yo no soy la persona que me escribió". Observemos cuán fácilmente comprendemos esta curiosa e irregular forma de utilizar el pronombre "yo". Parece completamente natural leer la frase de esta manera, a pesar de que en casi todas las situaciones hemos aprendido a crear sin darnos cuenta un modelo mental de alguna persona –el orador o el escritor de la frase– a quien atribuimos el deseo de comunicar alguna idea. En cambio, aquí tomamos "yo" con acepción enteramente nueva. ¿Cómo explicarlo? ¿Qué clase de indicios nos hacen reconocer que al ver la palabra "yo" no debemos pensar en el autor de la frase, sino en la propia frase?

Muchas exposiciones simplificadas del trabajo de Gödel dan la siguiente traducción de su famosa proposición: "Yo no soy demostrable en el sistema axiomático *S*". La autoalusión lograda a costa de los más sagaces artificios en el trabajo de Gödel ha sido aquí subrepticiamente colada de rondón en la palabra –engañosamente simple– "yo", y nosotros podemos, más aún, lo hacemos automáticamente, admitir sin esfuerzo que la frase está hablando de sí misma. De todas formas, la verdad es que sí nos resultaría difícil creer que la siguiente oración pueda estar hablando de sí misma: "Cariño, ya he sacado yo el cubo de la basura".

La posibilidad de alusión ambigua implícita en el pronombre de primera persona es fuente de muchas frases autoalusivas interesantes. Fijémonos en unas cuantas:

"Yo no soy sujeto de esta frase."

"Yo tengo celos de la primera palabra de esta frase."

"Vaya, qué te parece, esta frase parece hablar de mí."

"Yo estoy simultáneamente escribiendo y siendo escrito."

Se abre de esta forma todo un nuevo campo de posibilidades. ¿No podría servir el "yo" para significar el instrumento de escritura ("Yo no soy una estilográfica"), el lenguaje ("Yo procedo de raíces indo-europeas"), el papel ("Córteme una tira, retuérzame media vuelta, y pégueme en forma de banda de Möbius, por favor")? Una de las posibilidades más rebuscadas sería que "yo" no designase a los objetos materiales que percibimos frente a nosotros, sino alguna esencia incorpórea e intangible, tal vez, el significado de la frase. Ahora bien, ¿qué entender por significado? Exploramos estas ideas en los ejemplos siguientes:

"Yo soy el significado de esta frase."

"Yo soy el pensamiento que está Vd. pensando en este momento."

Que conducen a:

"En este instante, yo estoy pensando en mí mismo."

"Yo soy el sistema de impulsos neuronales que están ocurriendo en su cerebro conforme Vd. va leyendo el conjunto de letras de esta frase y piensa en mí."

"Esta frase inerte es mi cuerpo, pero mi alma está viva en su mente."

Estas inquietantes frases suscitan vívidamente el problema de la conexión entre las ideas (en sentido platónico), la actividad mental, la actividad fisiológica del cerebro y los símbolos externos desencadenantes de todo el proceso.

Aún queda más de relieve el tema en la pregunta autoalusiva "¿Cree usted que alguien ha podido tener antes exactamente este mismo pensamiento?". Para dar respuesta a esta cuestión se precisaría saber si dos cerebros distintos pueden tener exactamente el mismo pensamiento (análogamente a como dos ordenadores electrónicos diferentes pueden ejecutar un mismo programa). ¿Son los pensamientos ideas platónicas, algo cuya esencia existe con

independencia del cerebro donde están ocurriendo? De contestar "sí, los pensamientos son independientes del cerebro", nuestra preguna autoalusiva tendría respuesta afirmativa. Y si contestásemos que no, entonces nadie podría haber tenido jamás el mismo pensamiento anteriormente.

Ciertas frases autoalusivas conllevan curiosos tipos de comunicación entre la frase y sus amigos humanos:

"Está usted bajo mi control, porque estará leyéndome hasta terminarme."

"¿Es usted la persona que me escribe o la persona que me percibe?"

"Usted y yo solamente podemos comunicarnos en un sentido, porque usted es una persona, y yo no soy más que una frase."

"Mientras usted no me lea, la segunda palabra de esta frase carecerá de referente."

"El lector de esta frase sólo existe mientras me está leyendo."

¡La última frase de este grupo sí que es pensamiento alarmante!

"¡A ver, qué pasa ahí fuera! ¿es *usted* quién me está leyendo, o es algún otro?"

"Oiga, ¿no me ha escrito usted antes en algún sitio?"

La primera de las dos frases superiores se dirige a su lector; la segunda, a su autor. Veamos en qué términos se dirige un autor a una frase:

"Oye, ¿no te escrito yo antes en otra parte?"

Muchas frases contienen términos cuyo referente es difícil de precisar a causa de su ambigüedad, quizá fortuita o tal vez deliberada:

"Estu frase no es autoalusiva, porque 'estu' no es una palabra."

"Ningún idioma es capaz de expresar sin ambigüedad todo pensamiento, y éste menos que ninguno."

Dirijámonos ahora a una categoría del máximo interés, a saber, frases que tratan de los idiomas en que se encuentran, en que se encontraron alguna vez, o en los que podrían haber estado:

"Cuando no se la mira, esta frase está en inglés."

"Tuve que traducir esta frase al español, porque no era capaz de leerla en el original sánscrito."

"La frase que tiene ante sí estuvo en húngaro el año pasado durante todo un mes, y tan sólo recientemente ha sido vuelta a traducir al español."

"Si esta frase estuviera en chino diría algo distinto."

,oerbeh ne areivutse esarf atse iS"
".amrof atse ed aíreel al detsu

Las dos últimas frases son ejemplos de condicionales contrafácticas. Tales proposiciones declaran en su primera

cláusula (antecedente) una situación negada por lo que tenemos ante la vista (situación que algunos llaman "mundo posible"), mientras su segunda cláusula (el consecuente) procede a extraer alguna consecuencia de tal situación. He aquí algunas intrigantes condicionales contrafácticas y autoalusivas con que me he tropezado:

"Si esta frase no existiera, alguien la habría inventado ya."

"Si yo hubiese terminado esta frase..."

"Si no existieran frases contrafácticas, ésta no sería paradójica."

"Si los deseos fuesen caballos, el antecedente de esta condicional sería verdadera."

"Si esta frase fuera falsa, los mendigos irían a caballo."

"¿Qué sería esta frase si no fuese autoalusiva?"

"¿Qué aspecto tendría esta frase si π tuviera el valor 3?"

Vale la pena detenerse un poco en esta última, inventada por Scott Kim. En un mundo donde π tuviera efectivamente el valor 3 no nos preguntaríamos como serían las cosas "si π valiera 3". Podríamos decir "si π fuera 2" o "si π *no fuera* 3". Por tanto, la primera respuesta que se nos ocurriera podría ser:

"¿Qué aspecto tendría esta frase si π no tuviera el valor 3?"

Pero hay una dificultad. El referente de "esta frase" acabar de mudar de identidad. ¿Es lícito, entonces, decir que la segunda frase es respuesta de la primera? Es un poco lo mismo que si una persona meditase "¿Qué estaría haciendo yo ahora si mis genes fueran otros?" El problema es que no sería ella misma, sería otra persona, tal vez su banquero o su fregona. El pronombre "yo" no es completamente capaz de resistir incólume la transmutación a mundos hipotéticos tan extraños.

Mas la contrafáctica anterior presenta un problema todavía más serio. Cambiar el valor π es, sin ánimo de exagerar, cambiar de raíz las matemáticas, y es presumible que no puedan alterarse radicalmente las matemáticas sin trastocar también toda la trama del universo donde vivimos. Por ello, es muy dudoso que ninguno de los conceptos de la frase tuviera el menor sentido si π fuese 3 (incluidos los conceptos de "π", "3", etcétera).

He aquí otras dos contrafácticas más con las que usted puede cargar la pipa e ir fumando:

"Si en español se usara el subjuntivo, esta frase sería gramaticalmente correcta."

"Esta frase tendría cinco palabras si fuese seis palabras más corta."

Estos dos admirables ejemplos, inventados por Ann C. Trail (responsable también de otros ya citados en el artículo) nos obligan a prestar atención a las frases que hacen comentarios sobre su propia forma, y que son sensiblemente diferentes de las que hacen manifestaciones sobre su contenido (como la paradoja del mentiroso, o la frase que dice "Esta frase no trata acerca de sí misma, sino de si trata acerca de sí misma"). Es fácil construir frases que aludan a su propia forma, pero no es fácil lograr que sean interesantes. He aquí unas cuantas bastante buenas:

"porque no se me ocurrió cómo darle un buen comienzo."

"Esta frase estaba en pretérito imperfecto."

"Esta frase tiene contiene dos verbos."

"una preposición. Esta frase acaba en"

"Durante el tiempo que usted necesita para leer esta frase, su cerebro hubiera podido procesar noventa y seis letras."

David Moser, de Indiana, es especialista en autoalusión en todas sus facetas. (Incluso ha escrito un cuento formado sólo por frases autoalusivas.) Podría parecer improbable que puedan llegar a desarrollarse y florecer diferentes estilos en una parcela tan minúscula como ésta de la autoalusión, pero la verdad es que Moser tiene un estilo muy característico. Como agudamente hizo notar un amigo suyo, "Si a David Moser se le hubiera ocurrida esta frase, hubiera resultado más graciosa". Hemos citado ya muchas creaciones de Moser en el artículo. He aquí algunas delicias más del mismo horno:

"Esta frase no está. Completa. Esta, tampoco."

"Esta frase contiene una flutipa de español no convencional."

"Esta glúbica contiene muchas flutipas no esclaras en castellano, pero el plugandispo general puede glotularse del contexto."

"¿Es casa de siete palabras esta frase?"

"Esta frase tiene cinco (5) palabras."

Y otras cuantas joyas más:

"Esta es ser, o en realidad una no ser, he ahí la cuestión, combinación de dos frases."

"¡Cuánto me gusta verte comer con los ojos las curvas y perfiles de mis tipos de imprenta!"

"Este enunciado !!!! es exclamador precoz."

Las frases que, como estas últimas, hablan de la distribución de sus signos ortográficos pueden ser muy graciosas; veamos otras dos:

"Esta frase, aunque no interrogativa, acaba en interrogante?"

"Esta frase no lleva signos ortográficos coma las demás sí punto"

Otro ingenioso creador de frases autoalusivas es Donald Byrd, de quien también hemos citado unas cuantas. Veamos otro par de su cosecha:

"Esta frase aquí no conoze castellano mucho bien."

"Si se encuentra usted esta frase en la carretera, bórrela en seguida."

Esta segunda recuerda, por su forma, el aforismo budista "Si por el camino te encuentras con el Buda, mátalo".

Hay otro rico filón de frases autoalusivas fundadas en la analogía de la forma; pero desdichadamente sólo puedo presentar otro ejemplo, un agudo comentario del compositor John Cage: "No tengo nada que decir, y ya lo estoy diciendo", lo que nos sugiere el giro "no tengo nada a que aludir, y ya lo estoy aludiendo".

Algunas de las mejores frases autoalusivas son tan breves como sabrosas. He aquí algunas de mis favoritas, que al parecer desafían cualquier tipo de categorización:

"¿Me lee usted?"

"Este punto está bien tomado."

"Le estoy haciendo trampas."

"He sido condenada a muerte."

Evidentemente, ningún artículo sobre autoalusión podría quedar completo sin algunos ejemplos de profecías autorrealizadas:

"Esta profecía se cumplirá."

"Esta frase habrá terminado antes de que pueda decir 'fin de la frase'."

"Evidentemente, ningún artículo sobre autoalusión podría quedar completo sin algunos ejemplos de profecías autorrealizadas."

"¿No le hace pensar esta frase en Agatha Christie?"

Resulta intrigante esta última frase. Es obvio que nada tiene que ver con Agatha Christie, ni corresponde a su estilo y, por tanto, la respuesta debería ser no. ¡Pero le apuesto a que no es capaz de leerla sin que le venga a la mente!

Las frases presentadas en este artículo fueron inventadas por muchas personas, cuyos nombres no todos conozco. Unas cuantas son mías. Amén de los citados estoy en deuda explícita con Robert Filman y Margaret Minsky. Invito a los lectores a enviarme sus propios guisos autoalusivos. Advertencia: Los habituados a este tipo de concocciones pueden sufrir de adicción.

Y al terminar, no puedo negarme a la súplica de la siguiente frase: "Por favor, publíqueme en su colección de frases autoalusivas".

Taller y laboratorio

Nuevos montajes para exhibiciones con láser

Jearl Walker

El pasado mes de octubre les describí algunos de los deslumbrantes e instructivos efectos ópticos que pueden conseguirse con la luz pura e intensa de los láseres. Les dije entonces que más adelante les expondría algunas ideas acerca de cómo preparar una exhibición de aficionado en un aula o en casa. Esto es lo que voy a hacer ahora, ofreciéndoles además algunas de las muchas sugerencias procedentes de lectores, que son resultado de mi artículo anterior.

El grupo musical Génesis lleva mucho tiempo acompañándose de láser. Fue en uno de los recitales de este grupo donde vi una exhibición especialmente bella. Durante uno de los números, los tramoyistas lanzaron sobre el escenario una espesa niebla de nieve carbónica, que cruzaba, en dirección ascendente, un haz de láser formando un pequeño ángulo con la vertical. El haz se hacía visible a causa de la dispersión que sobre la luz ejercían las gotitas de niebla. Un espejo montado en un motor producía la rotación del haz en torno a la vertical a una velocidad acompasada a la música. El haz procedía de un láser pulsante gaseoso, por lo que el cono que formaba era intermitente y aparecía como cortado o separado en líneas discontinuas. Supongo que el gas debía ser una mezcla de criptón y argón, que en un láser pueden generar más de un color, ya que lo que se veía era un cono giratorio brillante formado por cuatro colores diferentes. El efecto parecía cosa de magia.

David Yoel, alumno mío en la Universidad estatal de Cleveland, ha ideado un procedimiento para generar un cono luminoso más modesto que pudimos contemplar, en clase, de frente y no de costado. Como no disponíamos de láser policromático ni de máquina para hacer nieve carbónica, tuvimos que trabajar con nuestro láser de helioneón de 15 miliwatt y con el humo producido por un explosivo de escenario como los que se emplean en los números de magia. La reflexión de la luz del láser la conseguimos mediante un espejo que Yoel montó en el extremo de un eje giratorio, sirviéndose de una articulación y un resorte.

Cuando el eje estaba inmóvil, el espejo quedaba perpendicular a él y reflejaba el haz directamente al centro de una pantalla. Cuando el eje giraba, la fuerza centrífuga provocaba la inclinación del espejo. Esta inclinación era tanto mayor cuanto más rápido giraba el eje, aumentando así la desviación del haz. La rotación hizo que el haz se abriera formando un cono con su eje apuntando al centro de la pantalla. Yoel regulaba el tamaño del cono ajustando la velocidad del eje. En este dispositivo es muy importante la rigidez del resorte y hay que probar y probar resortes hasta encontrar uno adecuado.

Si se dispone de un láser policromático, es posible separar el cono en colores distintos colocando en el camino del haz un dispositivo dispersante, como un prisma o una rejilla de difracción. Este dispositivo se instala en un motor que lo haga oscilar adelante y atrás, a través del haz. Los colores emitidos por el láser emergen bajo ángulos distintos en virtud de la dispersión. Al tiempo que oscila el prisma o la rejilla de difracción, los colores emergentes efectúan un barrido de la zona ocupada por una rendija que la luz debe atravesar antes de llegar al espejo giratorio. De esta forma, el color que sale al exterior varía a la vez que se mueve el prisma o la rejilla. En el libro *Light and Its Uses,* que se cita en la bibliografía de este número, se encuentran planos para construir un láser que emite varios colores.

La explosión de la pólvora tiene por objeto lanzar al aire un gran número de partículas que dispersen la luz láser. Estas partículas aumentan la visibilidad del cono, pues si el aire estuviera perfectamente limpio, no serían visibles ni el haz ni el cono, salvo por reflexión en la pantalla. Montamos por ello cuatro lámparas de destello que podían dispararse pulsando un sólo botón y que encendían varios trozos de papel de fogonazo para espectáculos de magia, produciendo el estallido de la pólvora esparcida sobre el papel.

El tamaño de las partículas se encuentra entre los límites en que dispersan la luz tanto por difracción como por reflexión. Resulta así que la luz se dispersa fuertemente hacia adelante y hacia atrás, pero débilmente hacia los lados. En mis demostraciones para los alumnos coloqué el láser sobre una tarima y lo apunté hacia los sistemas ópticos que había dispuesto junto al fondo del aula. El espejo giratorio se encargó de reflejar la luz láser hacia atrás sobre una pantalla situada en el frente de la clase. (Si alguien intenta una demostración similar, que se asegure de que los haces están suficientemente elevados para que queden muy por encima de toda persona de gran estatura que se encuentre de pie en la sala. El láser y los sistemas ópticos se fijarán rígidamente en posición para evitar que una desalineación fortuita pueda dirigir el haz sobre el auditorio.) Al ponerse en marcha el láser, inmediatamente después de las explosiones, el aire apareció como bordado por relucientes rayos de luz roja por encima del auditorio.

La salida de 15 miliwatt de nuestro láser es más que suficiente para cualquier exhibición; Yoel colocó algunos pequeños portaobjetos de microscopio formando ángulo con el haz para provocar efectos ópticos diversos separando parte de la luz. Aunque un portaobjetos transmite la mayor parte de la luz que le llega, refleja una fracción de ella. Para controlar la dirección de la luz reflejada, Yoel dispuso varios solenoides, cada uno con un espejito montado en el eje. Cuando el eje de un solenoide sobresalía, el espejo dirigía el haz hacia un montaje óptico determinado. Cuando el eje estaba retraído, el haz pasaba de largo junto al espejo yendo a parar a otro montaje óptico al otro lado del solenoide. Así podía Yoel hacer pasar el haz de un montaje a otro mediante un interruptor que controlaba la corriente del solenoide.

En mi artículo de octubre ofrecí a los lectores ejemplares de un filtro de Ronchi especialmente útil. Los interesados que lo hayan obtenido pueden crear imágenes más nítidas en una figura de interferencia desprendiendo la capa protectora de mylar existente en una de las caras de la rejilla. Me quedan todavía filtros de ese tipo; si a alguien le interesan, puede remitirme un dólar y una etiqueta con sus señas al departamento de física de la Universidad estatal de Cleveland, Cleveland, Ohio 44115. La imagen que crean estos filtros presenta una gran calidad cuando el láser desarrolla una potencia de algunos miliwatt, pero puede ser decepcionante empleando láseres más débiles.

En octubre también les describí cómo pueden crearse franjas de interferencias dirigiendo luz láser a través de una lámina de plástico translúcido recubierto de cola de aviación o pegamento duco. He hecho pruebas añadiendo trocitos de plástico y de metal a la cola, y los mejores resultados los he conseguido con unas tiras de plástico, de una anchura no superior a un milímetro, que bajo el nombre de Diamond Dust vende la Permafrost Division de Potter Industries, Inc. Con este sistema conseguí no sólo franjas brillantes y oscuras, sino también manchas brillantes que resultaban de la refracción de la luz a través de los trozos de plástico. En el momento en que hice girar la lámina dentro del haz, que se abría porque puse una lente convexa en su trayectoria, las manchas brillantes empezaron a revolotear en la pantalla.

Entre quienes me solicitaron filtros de Ronchi, algunos me han expuesto sus propias experiencias con luz láser. Así, Christopher Heilman ha ideado un procedimiento para proyectar una imagen que se asemeja a una fotografía del sol hecha en un solo color: el correspondiente a una raya de emisión del hidrógeno. Para ello, emplea una lente con el fin de abrir el haz procedente de su láser de helio-neón de cinco miliwatt y luego dirige el haz a través de una pequeña esfera de vidrio de densidad no homogénea. Lo que se aprecia en pantalla es una esfera ilusoria.

Roger Warden trabaja con un disco de plástico que monta en un motor que gira lentamente. Cuando el haz del láser intercepta una de las estrías profundas, que previamente ha practicado en el plástico, en la pantalla aparece una figura que recuerda a una estrella. Warden también aconseja pulverizar agua sobre el plástico. Frank B. Fadich emplea vidrio de plomo tallado y figurillas de plástico para crear imágenes con un láser de helio-neón de cinco miliwatt. Forma figuras muy interesantes cuando intercala en el haz una bolita transparente dotada de infinidad de caras planas. Gertrude Reagan genera figuras de interferencia dirigiendo el haz de un láser por el cuello de una botella de ginebra para hacerlo salir por el fondo; estas figuras varían al mover la botella circularmente dentro del haz.

Gary F. Benedict, de Chandler, Arizona, consigue un haz intermitente a partir de uno continuo, como el de un láser de helio-neón, intercalando en el mismo un disco opaco con el perímetro dentado, de manera que cuando el disco gire el haz resulte interceptado periódicamente. Este efecto puede aprovecharse para conseguir un cono de

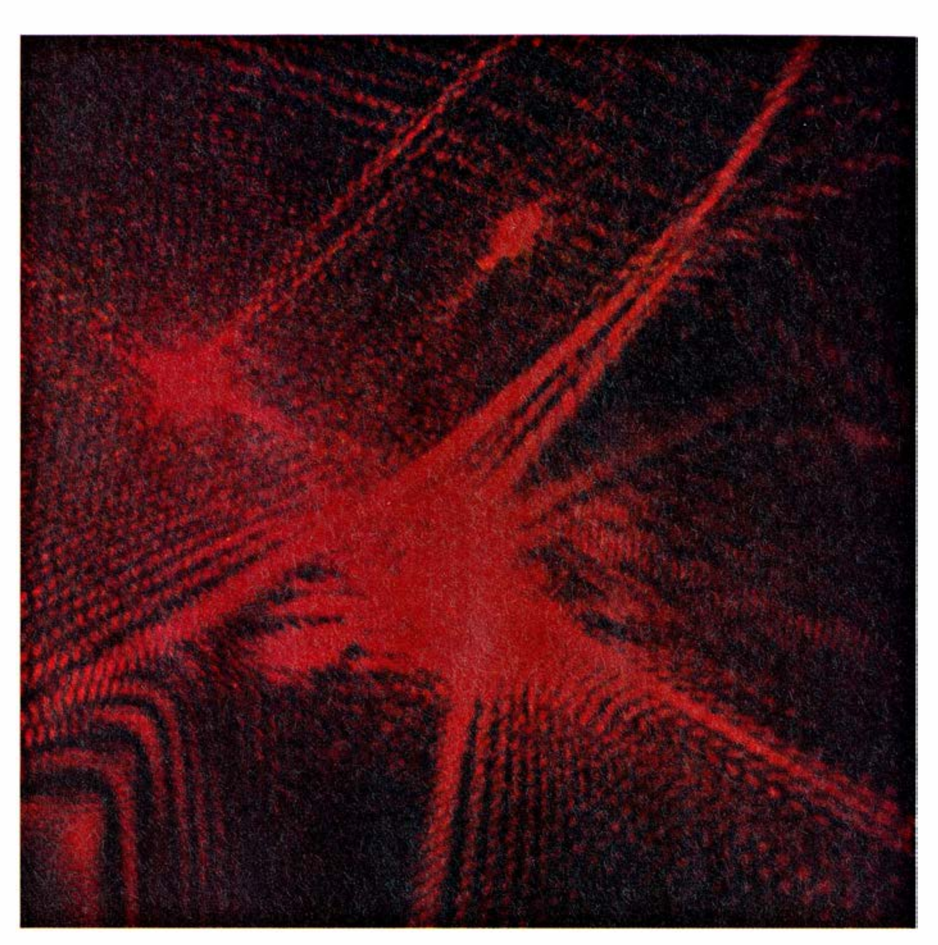
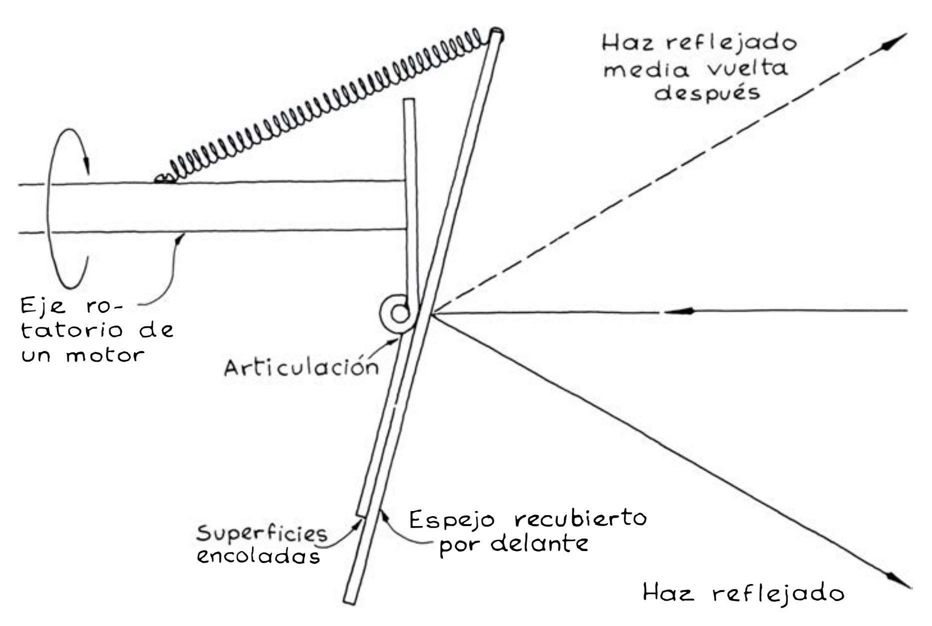


Figura formada por luz láser dirigida a través de una lámina recubierta de cola y tiras de plástico

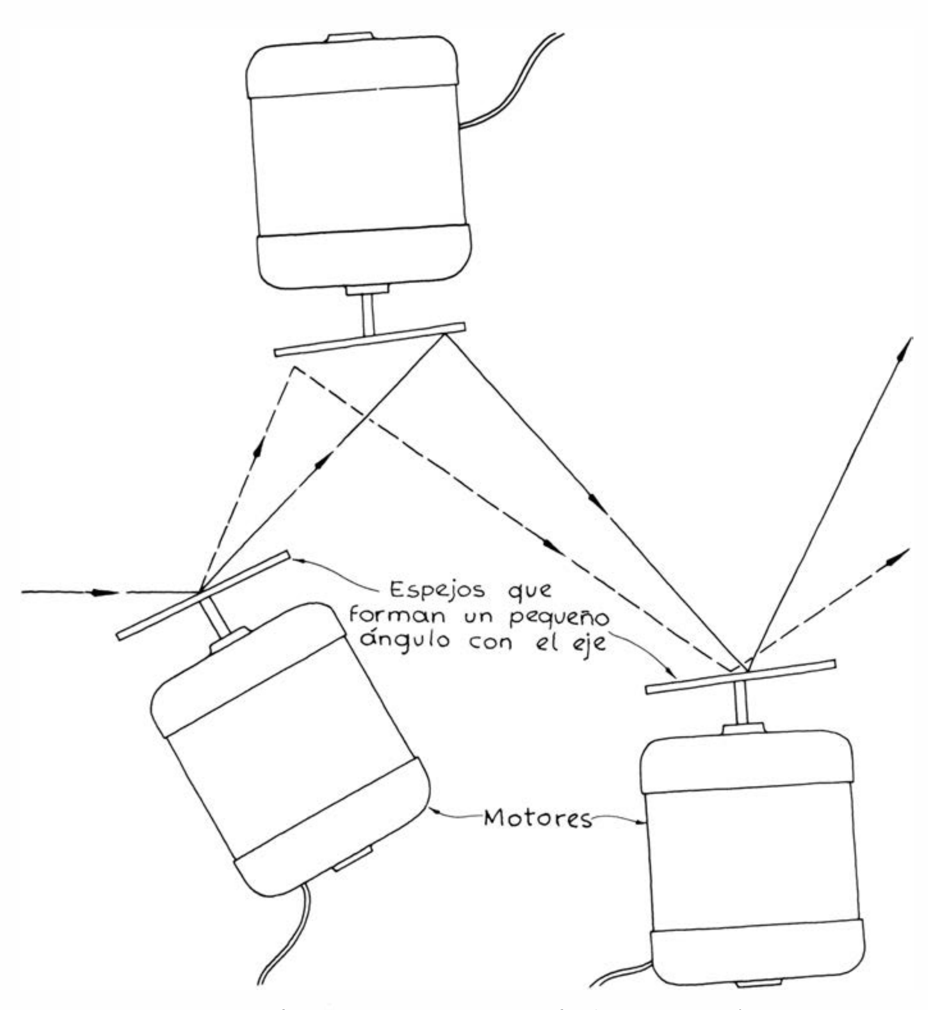


Figura formada a través de la esfera de vidrio de Christopher Heilman



Montaje de David Yoel para obtener un cono de luz

muchos rayos de luz como el que vi en el recital de rock. Además, en vez de interceptar el haz totalmente puede trabajarse con un disco de dientes reflectores y enviarse la luz reflejada a otro sistema óptico cada vez que los dientes pasen por el haz. También sugiere Benedict utilizar una varilla de vidrio giratoria con el eje longitudinal perpendicular al haz del láser; con este montaje, cuando la varilla entre en el haz ésta actuará de lente convexa y modificará la trayectoria del haz. Si la varilla girase entonces a gran velocidad, la persistencia del sistema visual haría que éste mantuviera la imagen percibida.



Dispositivo de tres espejos giratorios de Gary E. Tomlinson

He recibido muchas cartas por las que se me sugieren procedimientos para crear imágenes en una pantalla por reflexión de un haz. Tom Glanzman, de la Universidad de Duke, produce la reflexión del haz de un láser sobre la superficie del mercurio encapsulado en un recipiente y depositado junto a un altavoz, cuyas vibraciones hacen ondular la superficie del mercurio y con ello varía la reflexión del haz.

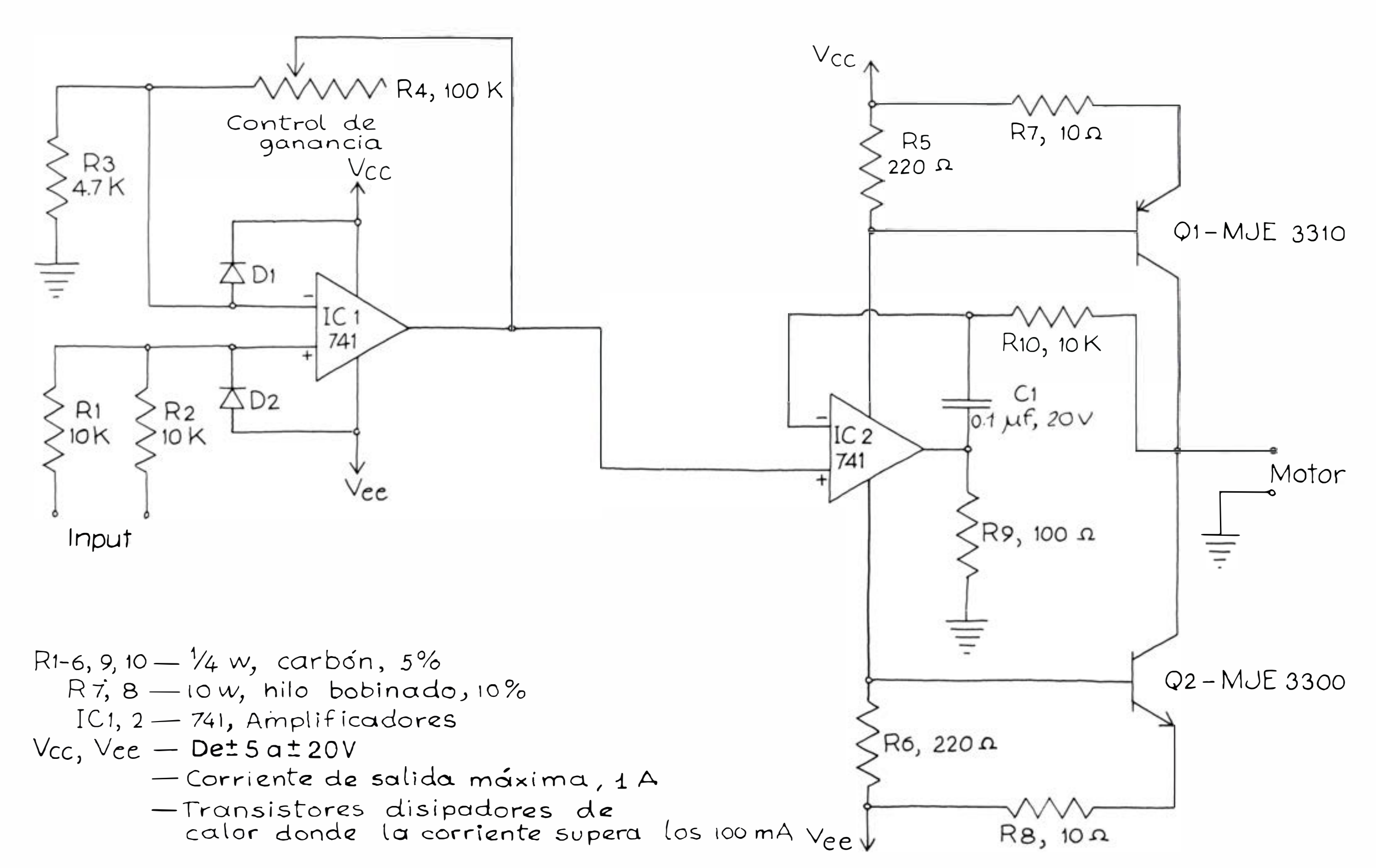
Robert J. Kearney, de la Universidad de Idaho, monta un espejito sobre una membrana de goma que a su vez fija a un altavoz de poco precio. La respuesta del altavoz, según afirma, es relativamente indiferente al grosor de la goma. El sistema puede ajustarse añadiendo pequeños contrapesos a la goma con el fin de regular la composición de sus vibraciones. (Los espejos que se empleen con láser deben tener metalizada la cara anterior y ser de buena calidad; de lo contrario el haz puede resultar dispersado en exceso.)

Una de las técnicas más interesantes es la procedente de Arthur Eisenkraft, de Ossining, New York, quien monta un espejo de poco peso en un altavoz valiéndose de un bucle de cinta adhesiva. El espejo puede moverse libremente en razón de la holgura del montaje. Jugando con la posición del espejo, Eisenkraft consigue que refleje el haz de un láser con la misma intensidad tanto en sentido vertical como horizontal. Sin este ajuste, el espejo reflejaría el haz preferentemente a lo largo de un solo eje de la pantalla, con lo que se tendrían figuras alargadas.

Eisenkraft centró su interés en las figuras que resultan cuando por el altavoz se reproducen discos de diferentes estilos. Así, con "Sgt. Pepper's Lonely Hearts Club Band", de los Beatles, obtuvo una mezcla de curvas de Lissajous puras y dibujos aleatorios. Es probable que las primeras estuvieran originadas por la música electrónica que los Beatles entrelazan en sus canciones.

Las mejores piezas para crear dibujos en la pantalla resultaron ser las grabaciones de música electrónica de Keith Emerson. En particular, Eisenkraft recomienda la suite *Karelia*, de Sibelius, que forma parte del álbum "Five-Bridge Suite", interpretado por Emerson y los Nice.

Con casi toda la música rock grabada por grupos europeos he conseguido buenos resultados. Por ejemplo, el grupo Tangerine Dream trabaja casi exclusivamente con sintetizadores, y cuando su música se reproduce a través del altavoz de dos espejos que les describí en octubre, en la pantalla aparecen unas curvas de Lissajous de efectos hipnoti-



Circuito de la fuente de alimentación del sistema de cinco espejos de Gregory Yob

zantes. El sistema de un solo altavoz que también les describí en octubre responde a la música electrónica únicamente en la gama de las bajas frecuencias.

Además de convertir la música electrónica en figuras que aparecen en una pantalla, la luz puede reconvertirse a su vez en sonido. Esto lo ha puesto de manifiesto Eisenkraft intercalando una fotocélula en el haz. La señal recogida por ésta pasa sucesivamente por un preamplificador, un amplificador y un altavoz, recuperándose así las señales electrónicas codificadas en la música original.

Los profesores que dispongan de un tanque de olas entre su material de enseñanza pueden montar espejos en la paleta generadora de olas. Hay también quien sugiere montar un espejo en el eje de un motor con el plano del espejo formando un pequeño ángulo con el eje. Al poner en marcha el motor, el espejo gira dando al haz la forma de un cono de luz. Y, si el haz se hace intermitente antes de que llegue al espejo, el efecto es similar al que produce el cono que contemplé en el concierto de Génesis. En la pantalla no se ve un dibujo descrito por un trazo continuo, sino puntos que parecen perseguirse mutuamente describiendo una trayectoria curva.

Gary E. Tomlinson, de Grand Rapids, Michigan, me ha expuesto un sistema como éste formado por tres espejos giratorios. Cada uno está encolado con una inclinación determinada al extremo de un eje. Ajustando el ángulo de inclinación de cada espejo y regulando la marcha de los motores, Tomlinson consigue crear círculos, elipses, estrellas, cuadrados y otras figuras sobre una pantalla.

Gregory Yob, de Palo Alto, California, ha construido un sistema de cinco motores con espejos inclinados montados sobre sus ejes. Los espejos los dispone de suerte que el menos inclinado sea el primero en reflejar el haz del láser, que va a parar a los demás espejos sucesivamente. En la ilustración superior se representa la fuente de alimentación de los motores, circuito que, según Yob, hace que los motores funcionen sincrónicamente.

Antes de que el haz llegue a la pantalla, se convierte de continuo a intermitente mediante un rodete provisto de 16 dientes triangulares. Este rodete está montado en un motor enlazado a un husillo. Por su parte, el motor está conectado a un potenciómetro de cursor de forma que a Yob le sea posible regular la velocidad del rodete, que está accionado por un motor provisto de reducción por engranajes. Empleando este montaje, Yob puede hacer variar los límites entre los cuales los dientes interceptan el haz. Entonces, cuanto más se introducen dentro del haz, tanto menor es el espacio que dejan para la transmisión: en la pantalla aparecen puntos. Pero si el haz es interceptado únicamente por las puntas de los dientes, aparecen rayas.

Yob ha ideado un dispositivo muy sencillo para modular la reflexión del haz de un láser utilizando la mano o la voz propia. A tal fin, dispone el láser verticalmente dentro de un pedestal con trípode, cuya cara superior es un cuadrado de unos quince centímetros de lado. El haz del láser sale a través de un agujero existente en el centro de dicha superficie. El operador queda así también protegido del haz vertical.

Para interceptar el haz, Yob unió un espejo de poco peso a un trozo de goma extendida sobre una lata de zumo de frutas. Le valía la goma fabricada para hacer globos; el espejo tenía el frente recubierto de aluminio. Se deja abierto el otro lado de la lata. Para dirigir el haz, Yob mueve la lata dentro del haz, o bien habla por el lado abierto de la lata haciendo así que el espejo vibre. También puede colocar plástico grabado sobre la parte superior del alojamiento del láser; moviendo entonces el plástico dentro del haz se crean las imágenes de las que traté en mi artículo de octubre. Yob afirma que pueden conseguirse buenas figuras con un tipo de vi-

drio de color conocido como craquelado alemán transparente.

Abid Tanovic, de Venice, California, me detallaba cómo usaba un prisma basculante para modificar la trayectoria del haz y crear interesantes figuras en una pantalla. Todo rayo luminoso que penetre por una cara inclinada de un prisma basculante paralelamente al lado mayor se refracta hacia éste, se refleja en él y sale del prisma por la otra cara inclinada viajando en la dirección original. En el lado mayor la reflexión es total, lo que significa que, debido al ángulo bajo el cual el rayo incide sobre dicha cara en combinación con el valor del índice de refracción del vidrio en dicho lugar, no puede refractarse luz alguna hacia el exterior del prisma.

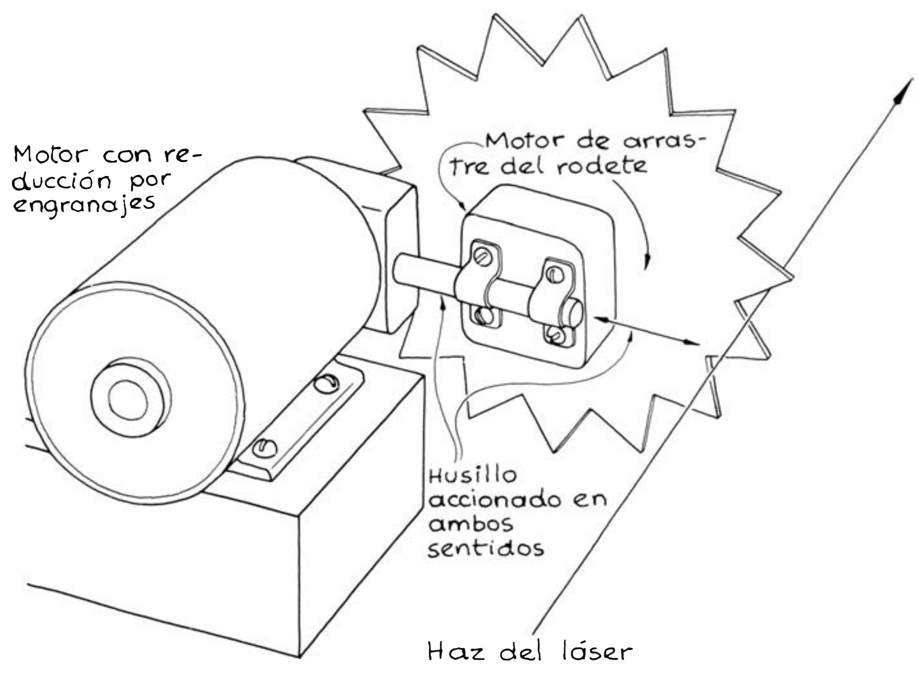
Si el prisma se hace girar en torno al eje de la luz incidente, la imagen gira el doble. Por ejemplo, mirando a través del prisma paralelamente a su lado mayor mientras se le hace girar 180 grados en torno a la visual, la escena que se ve a través del prisma girará 360 grados. Tanovic incorpora este efecto a su montaje instalando un prisma basculante dentro de un tubo que fija sobre cojinetes. A este tubo se le hace girar muy rápidamente mediante una correa enlazada a un motor. De acuerdo con su misiva, el prisma podría montarse en el centro del tubo y el motor habría de tener una velocidad variable entre 800 revoluciones por minuto y cero a intervalos regulados.

Si a través del prisma giratorio se envía el haz de un láser, éste forma un círculo en la pantalla. El tamaño de este círculo depende parcialmente de la distancia al centro de rotación del punto por el que el haz penetró en el prisma, de suerte que cuanto menor es dicha distancia tanto menor es el círculo. También depende del ángulo bajo el que el haz penetra en el prisma. Para conseguir en la pantalla dibujos más interesantes, Tanovic coloca en la proximidad del prisma rejillas de difracción, lentes de Fresnel, vidrio esmerilado, plástico conformado o cualquier otra cosa de las que les he descrito. Las imágenes conseguidas fascinan a quienes las ven formarse, girar, dilatarse y contraerse. Con un láser pulsante, o con su haz modulado intermitentemente, las imágenes de la pantalla se encuentran en un círculo y cada una de las imágenes sucesivas tiene una orientación distinta.

La luz que emplea Tanovic para sus exhibiciones procede de un láser de criptón que emite azul, verde, amarillo y rojo. Al objeto de separar los colores, empieza enviando el haz a través de un prisma regular. Los colores van a parar a distintos lugares de un espejo montado en un altavoz vibratorio. Seguidamente, la luz atraviesa el prisma basculante giratorio y prosigue hacia la pantalla, donde aparecen los colores ordenados según el espectro desde el centro hacia la periferia. Disponiendo adecuadamente los componentes ópticos, puede hacer que el color del centro sea el azul o el rojo.

Los procedimientos que les he descrito son sólo unos cuantos de los muchos posibles que pueden adoptarse para un espectáculo con luz láser. Para hacer visible el haz, la nieve carbónica y el humo de una explosión pueden sustituirse por aceite arrojado con un pulverizador. Si se hace así, hay que tener cuidado en no mancharse ni dañar nada. Yo ya he estropeado una pantalla por descuido. Un haz de láser también da origen a figuras de interferencia cuando atraviesa un fluido viscoso que se mezcla por calentamiento. Entonces, al encontrar la luz índices de refracción variables dentro del fluido, el haz se interfiere consigo mismo y proyecta en una pantalla unas magníficas figuras de interferencia.

Cuando un haz de láser cruza un material plástico que se está fundiendo lentamente se desarrollan unas figuras de interferencia intrigantes. En algunos espectáculos comerciales con luz láser se emplean plásticos que el propio haz del láser funde; para este efecto se necesita más potencia de la que habitualmente tienen los láseres de aficionado. Por último, el espectáculo en su totalidad puede comandarse mediante un ordenador casero, programado para que actúe sobre los dispositivos ópticos al compás de la música de un magnetófono.



Montaje de Yob para modular un haz

En febrero de 1980 les describí un conjunto de experimentos relativos a la salsa bearnesa, que es una mezcla emulsionada caliente que se sirve con algunas comidas. Fundamentalmente esta salsa se compone de vinagre, vino, yemas de huevo y mantequilla diluidos. Según mi propia experiencia, se trata de un salsa de preparación sumamente frustrante por culpa de su tendencia a cuajarse, lo que suele ocurrirme precisamente cuando la estoy sirviendo a algún invitado. Recordarán que entonces planteé tres preguntas. ¿Cuáles son los factores que estabilizan la salsa haciendo que permanezca tersa y apetitosa? ¿Cuáles son los factores que producen la floculación de las gotitas de la mantequilla de la salsa, es decir, de la coalescencia de ésta en charquitos muy poco apetecibles? Y si la salsa se estropea así, ¿qué puede hacer el cocinero para recuperarla? Colleen Kelly, Rachel Kleinman, Karen Mehlman y Craig Deutsche, de Los Angeles, me han escrito acerca de las experiencias que han efectuado para responder a esas preguntas.

Las respuestas que yo les ofrecí no eran definitivas, ya que los conocimientos actuales sobre la física y química de la salsa son fragmentarios. Para describir la interacción de las bolitas de mantequilla con el mecanismo del fracaso de la salsa se han propuesto dos modelos. En uno de ellos se contempla cada bolita como si estuviera recubierta de cargas eléctricas negativas y se encontrara rodeada de una "atmósfera" de

cargas positivas. Luego, cuando dos bolitas se aproximan una a la otra, se repelen entre sí porque sus atmósferas tienen cargas del mismo signo. Si en las bolitas y en sus atmósferas hay carga suficiente no flocularán fácilmente. En este caso, se dice que la salsa es estable.

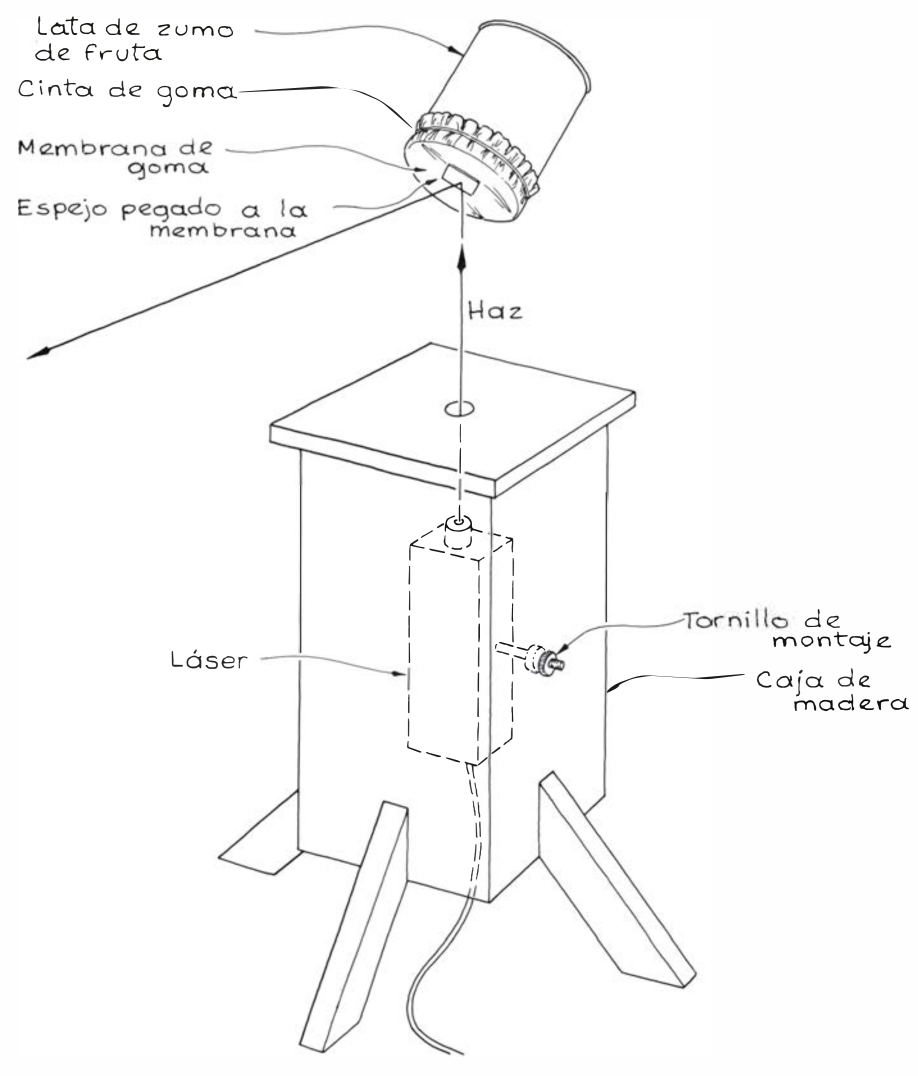
En el otro modelo, las bolitas se contemplan como si estuvieran recubiertas de lecitina procedente de la yema de los huevos. Las moléculas de lecitina se orientan todas con su extremo lipófilo hacia el interior de la bolita de mantequilla y su extremo hidrófilo apuntando hacia el exterior. Este último atrapa agua de la solución circundante, en virtud de lo cual las bolitas de mantequilla se cubren de una capa protectora de moléculas de agua. Así, las bolitas de mantequilla que habrían tenido tendencia a flocular no pueden hacerlo a causa de esta capa protectora.

Según el primer modelo, la salsa se malogra si la carga existente en las bolitas de mantequilla es demasiado baja. Cuando las bolitas chocan, coalescen y acaban formando una sola masa de mantequilla. En el otro modelo sobreviene el fracaso si las bolitas carecen de lecitina suficiente, pues entonces no tienen la capa protectora de agua necesaria para evitar la coalescencia.

A medida que el huevo "envejece", la lecitina se desintegra, reduciéndose la proporción de ésta respecto al colesterol. Por tanto, como la lecitina es emulsionante para las bolitas de mantequilla en agua y el colesterol es emulsionante para las gotitas de agua en mantequilla, un huevo que ya tenga días puede que no proporcione la lecitina necesaria para estabilizar la salsa, aunque quizá contenga el colesterol capaz de echarla a perder.

Las estudiantes que me han expuesto sus trabajos se ocuparon del papel que cumplen en la salsa las yemas de huevo. Mantuvieron éstas en un refrigerador, desprovistas de cáscara, durante cuatro días. Mehlman consiguió con éxito una salsa de vinagre, zumo de limón, crema y yemas de huevo. Una vez preparada la salsa, añadió una cucharadita y media de colesterol de calidad laboratorio a un tercio de copa de salsa. Aunque la mezcla floculó, recuperó su tersura agitándola vigorosamente. Parece evidente que el colesterol adicional destruyó la emulsión de la salsa. (Las cucharas son del tamaño de las usadas en los servicios de té o café.)

Kleinman hizo dos platos de salsa con yemas de huevo, zumo de limón y mantequilla sin salar. Para el primero usó huevos frescos y la salsa resultó tersa y estable. Para el segundo esperó a que los huevos tuvieran una semana y la salsa floculó. Añadió entonces una cucharada de lecitina líquida y, después de agitar, la salsa se recuperó. La lecitina puede obtenerse en las tiendas de alimentos dietéticos.



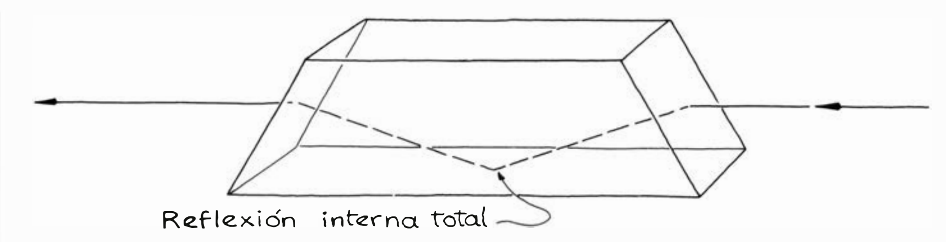
Alojamiento del láser de Yob

Dejó la mitad del plato a modo de control experimental. Añadió a la otra mitad dos cucharaditas de colesterol y floculó. Estos resultados parecen apoyar la hipótesis de que la lecitina es un agente estabilizador y el colesterol un agente desestabilizador. Con todo, esta salsa es impredictible, pues cuando Kleinman preparó un tercer plato y le añadió varias cucharaditas de colesterol, la salsa se espesó pero no floculó.

Kelly preparó una salsa con yemas de huevo, vinagre de vino tinto y margarina. Al añadirle varias cucharaditas de colesterol la salsa floculó; recuperó la tersura cuando le añadió, agitando, lecitina líquida. Para otro cuenco de salsa empleó huevos que había mantenido guardados durante seis días; la salsa no se mantuvo estable hasta que le hubo agregado varias cucharaditas de lecitina.

Además, ensayaron con las salsas para detectar algún efecto de la carga eléctrica sobre las gotitas de mantequilla. Si la salsa es estable en virtud de las atmósferas cargadas que rodean cada gotita, los iones liberados por las sales inorgánicas pueden llegar a neutralizar suficientemente la carga de las atmósferas para que las gotitas floculen. En algunos casos, las sales que liberan iones polivalentes deben favorecer la floculación más que las sales que liberan iones monovalentes.

Prepararon también muestras de salsa a las que añadieron distintas cantidades de cloruro sódico, cloruro magnésico, cloruro de aluminio, cloruro férrico, sulfato sódico y ortofosfato sódico ($NaCl$, $MgCl_2$, $AlCl_3$, $FeCl_3$, Na_2SO_4 y Na_3PO_4). No resultó nada interpretable. La salsa no manifestó tendencia alguna al aumento de floculación cuando la sal liberaba iones polivalentes. Hacen notar los estudiantes que con distintas recetas pueden obtenerse distintos resultados al añadir una sal y concluyen que la estabilización de una salsa bearnesa se debe, probablemente, a



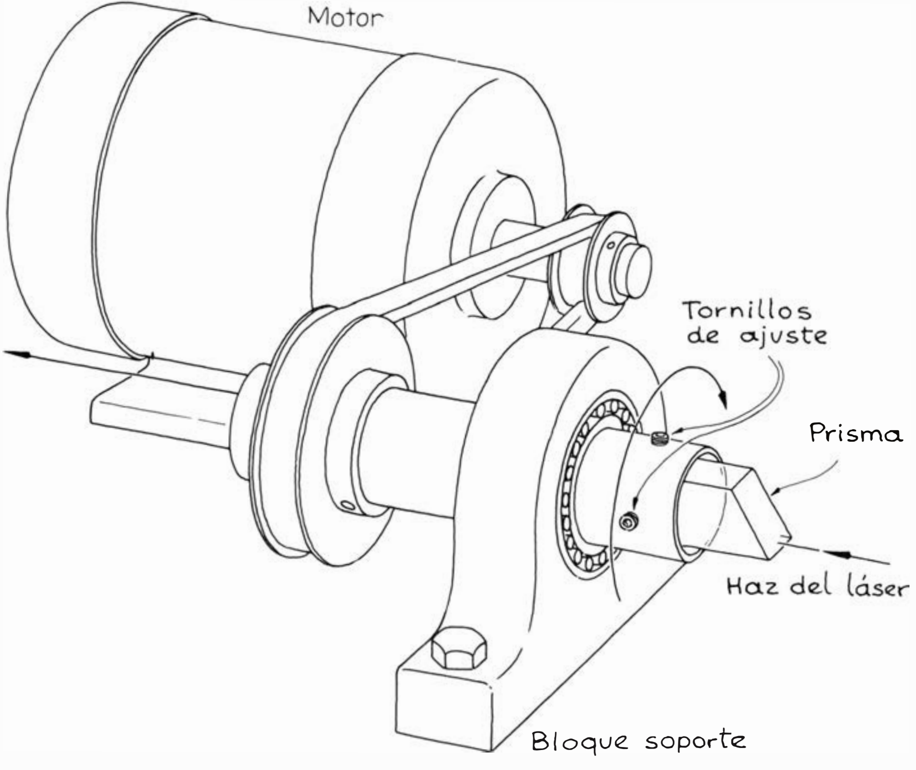
Efecto de un prisma basculante sobre el haz de un láser

la lecitina más que a la atmósfera cargada.

También he tenido noticias de Madeleine Kamman, chef profesional, profesora de cocina y autora del libro *The Making of a Cook*, uno de los pocos libros de cocina científicamente orientados. Muy finamente me ha llamado a capítulo acerca de mi disección de las salsas estropeadas. "La cosa está en que Vds. los científicos son muy graciosos queriendo que todo sea ciencia y esa salsa es muy veleidosa." Bueno, de acuerdo, pero su propio procedimiento tiene poco de acientífico.

El secreto de Kamman para estabilizar una salsa bearnesa durante un intervalo de unas cuatro horas, necesario en un restaurante, es preparar una infusión inicial que sea más líquida de lo habitual. Esta salsa se introduce en un perol que, a su vez, se introduce en otro que contenga agua a unos 55 grados Celsius, con el fin de mantenerla caliente. Entonces, mientras el líquido se evapora, la salsa se espesa y un cocinero experto ha de saber exactamente cuándo hay que retirarla del perol calentador antes de que la mantequilla comience a separarse en una capa. En ese momento se bate sobre la salsa una pizca de agua salada a unos 45 grados Celsius, según Kamman, al objeto de reducir la acidez que se forma durante la evaporación. En parte, esta adición de agua salada se hace también a efectos de sabor. Por otra parte, ello puede ser necesario no sólo por el sabor sino también para romper las gotitas de mantequilla que hayan floculado durante el largo tiempo de reposo.

Personalmente opino que la floculación es menos probable en la infusión inicial a causa de que el agua extra hace que los choques entre gotitas de mantequilla sean menos frecuentes. A medida que el agua se evapora, la floculación se hace más probable y, además, puede variar la distribución de carga dentro de la salsa. El batido y la adición de agua serán necesarios para invertir la floculación y para hacer que los choques de las gotitas de mantequilla sean menos probables.



Diseño de Abid Tanovic para montaje de un prisma basculante

Libros

Tres campos de la ciencia abordados con rigor y claridad de exposición

Ramón Pascual, Antonio Prevosti y Mercedes Durfort

PARTICLES AND FIELDS. Presentado por W. J. Kaufmann III. Freeman and Company; San Francisco, 1980. Se trata de un compendio de artículos, aparecidos en la prestigiosa revista *Scientific American,* que exponen el desarrollo de la física de las partículas elementales o física de altas energías, desde los años 50 hasta fechas muy recientes. El nivel del libro es elevado y creemos que su asimilación puede no ser fácil –a pesar de la introducción de William J. Kaufmann III– para los lectores que no estén algo avezados en el tema. Su particular estructura ofrece la ventaja de exponer la evolución histórica de los conceptos y mostrarse reiterativo –desde puntos de vista distintos– en los aspectos fundamentales. Pero también presenta inconvenientes, de orden léxico sobre todo, que creemos el lector puede superar con un ligero esfuerzo.

El libro constituye un eslabón más de la cadena iniciada con la teoría de los elementos químicos de Lavoisier y que continuó con la teoría atómica de Dalton, la demostración de la existencia del núcleo atómico por E. Rutherford y N. Bohr, el conocimiento de la estructura de los núcleos que siguió al descubrimiento del neutrón por Chadwick, y que en estos momentos acaba con la estructura de leptones y quarks que forman las partículas elementales conocidas. No sabemos si éste será el último eslabón de la cadena o bien se confirmará alguna de las hipótesis que ya han sido apuntadas acerca de la existencia de nuevas subestructuras de los leptones y los quarks.

La obra consta de tres partes bien diferenciadas. En la primera se presenta la situación de la física de las partículas elementales durante la década de los años 50 y primeros años 60. Encontramos en primer lugar un artículo de Erwin Schrödinger, uno de los creadores –y a la vez uno de los mayores críticos– de la mecánica cuántica. El artículo de Schrödinger presenta las líneas generales de la idea de dualidad onda-corpúsculo, analizando lo que es una partícula elemental, concepto que deja en una situación algo confusa; el autor explica también su rechazo del "salto cuántico" que, en su opinión, convierte en inaceptable la versión ortodoxa de la mecánica cuántica, versión que si bien es generalmente aceptada no deja de ofrecer algunos problemas teóricos de cierta entidad. Le siguen un artículo de Freeman J. Dyson y otro de Murray Gell-Mann y E. P. Rosenbaum que examinan, respectivamente, el instrumento básico de la física de las partículas elementales, la teoría de campos y el panorama de las partículas conocidas en aquellas fechas (1957). Dyson expone en su artículo de 1953 su creencia en la idoneidad de la teoría de los campos cuánticos como instrumento de descripción de las partículas elementales y de sus interacciones, opinión que si bien hoy es aceptada por todos los físicos en la versión de los campos de "gauge" o de contraste, quizá no era tan generalizada en aquella época. Por su parte, Gell-Mann y Rosenbaum detallan el conjunto de las partículas elementales conocidas, con inclusión de las llamadas partículas extrañas, cuya interpretación mediante la introducción de un nuevo número cuántico –la extrañeza– es plenamente satisfactoria y se ha utilizado más tarde en la familia de las partículas encantadas.

La primera parte del libro finaliza con un artículo de Geoffrey F. Chew, M. Gell-Mann y Arthur H. Rosenfeld, quienes nos recuerdan cuáles eran los intentos realizados hacia 1964 por clasificar el centenar de partículas elementales conocidas: el esquema de trayectorias de Regge, la "octava vía" de Gell-Mann y Ne'eman y las ideas del "bootstrap", sugiriendo ya la posibilidad de que quizá no todas las partículas fueran igualmente "elementales".

En la segunda parte del libro, formada por la reunión de cuatro artículos correspondientes al período 1975-1979, se abordan las bases de la teoría de los quarks. Las supuestas partículas elementales se agrupan en dos grandes tipos: los leptones y los hadrones; los últimos citados no son realmente elementales, sino agregados de dos o tres quarks.

En los artículos de Sidney D. Drell y Sheldon Lee Glashow se muestra que, mediante cuatro "sabores"de quarks, "arriba", "abajo", "extraño" y "encantado", cada uno de los cuales se presenta en tres "colores" distintos, se puede explicar satisfactoriamente el conjunto de los hadrones, incluso de aquellos descubiertos de manera un tanto espectacular a finales de 1974, los J/psi y sus compañeros, que dieron lugar a la confirmación de la existencia del número cuántico, o sabor, encanto, ya predicho teóricamente. El que ninguno de estos quarks haya sido detectado hasta ahora de manera directa, es decir, en estado libre, es el objeto de los otros dos artículos de Yoichiro Nambu y de Kenneth A. Johnson, quienes exponen los mecanismos de confinamiento de los quarks y el modelo de la bolsa que permiten entender, si bien aún no de manera completamente clara, por qué los quarks, de cuya existencia no creemos que hoy día dude ningún experto, no son directamente observables como partículas.

La última parte del libro comprende dos artículos. Firma el primero Steven Weinberg, quien expone las ideas de la teoría cuántica de campos de contraste que unifica las interacciones electromagnéticas y las débiles, convirtiendo así en una auténtica teoría la hipótesis fenomenológica de Fermi y unificándola con la más perfecta de las teorías físicas, la electrodinámica cuántica; se logra así una parte de la unificación soñada durante tantos años por los físicos más eminentes. El artículo de Weinberg acaba apuntando la posibilidad de que se unan, a la teoría electrodébil, las interacciones nucleares fuertes. El segundo artículo, firmado por Daniel Z. Freeman y Peter van Nieuwenhuizen, aborda las supersimetrías, las teorías unificadas de interacciones débiles, electromagnéticas, fuertes y gravitacionales que realizarían ya el sueño de la total unificación.

En resumen, el conjunto de los artículos presentados, escritos la mitad de ellos por premios Nobel que exponen los temas que les proporcionaron dicho galardón, ofrecen al lector una clara –si bien elevada– visión de los desarrollos de la física de las partículas elementales en las últimas décadas y constituyen un texto de importancia capital en el ámbito de la alta divulgación. Como ya hemos mencionado, una buena introducción de Kaufmann permite un enfoque rápido del contenido, y un buen índice y un conjunto de lecturas recomendadas completan la obra.

Tan sólo lamentamos –como es inevitable en textos referentes a campos tan rápidamente cambiantes– el que no se recojan artículos referentes a nuevas familias de partículas –el quark "fondo"– o a la teoría cuántica de campos de las interacciones fuertes, la cromodinámica cuántica, ni a los candidatos existentes a teorías unificadas, que si bien no incluyen la interacción gravitatoria, parecen tener mucha mayor verosimilitud que las supersimetrías y que podrán ser objeto de comprobación experimental en un breve plazo cuando finalicen los experimentos que miden la vida media del protón, que dichas teorías suponen inestable. Sin embargo, el lector interesado en estos temas puede hallar información sobre ellos en artículos aparecidos en *Investigación y Ciencia* en los últimos años. (R. P.)

EVOLUCION, por Theodosius Dobzhansky, Francisco J. Ayala, G. L. Stebbins y J. W. Valentine; XVI + 558 páginas. Ediciones Omega; Barcelona, 1980. (Traducción de Montserrat Aguadé, del original publicado en inglés en 1977). Esta obra es el resultado equilibrado de la colaboración de cuatro autores, representantes destacados, cada uno en su especialidad, del desarrollo actual de la teoría sintética de la evolución, lo cual constituye una garantía de objetividad y rigor científico en el tratamiento del tema. Entre los autores está Theodosius Dobzhansky, quien murió cuando el libro estaba en preparación, y a quienes los demás autores dedicaron el volumen en homenaje póstumo. La semejanza de enfoque da una unidad a la obra que muchas veces no se consigue, especialmente cuando el texto no es el resultado de la fusión del aporte de los distintos autores, sino que, como en el presente caso, cada capítulo ha sido escrito separadamente por uno de ellos. No obstante, esta unidad no significa uniformidad, sobre todo en los aspectos que no están totalmente establecidos, tan abundantes en la problemática evolutiva; esto constituye un enriquecimiento de la obra, y no un defecto, si se utiliza como texto para estudiantes de biología, como fuente de información biológica o especialistas en otras ramas de esta ciencia. La obra está escrita a un nivel medio, adaptado precisamente a este tipo de lectores. La colaboración de cuatro autores ha permitido tratar en un solo libro aspectos de la evolución que a menudo hay que buscar en textos distintos.

En el primer capítulo, escrito por Stebbins y titulado "La naturaleza de la evolución", se acota el concepto de la evolución y su significado, tanto para las ciencias biológicas como para el pensamiento humano en general. El planteamiento de este capítulo se basa totalmente en la teoría sintética de la evolución. La breve historia de la teoría de la evolución que se incluye en el mismo es realmente una historia del darwinismo y su transformación en la teoría sintética, precedida por un par de párrafos sobre Lamarck y el lamarckismo.

Los capítulos 2 al 5 tratan de la evolución de las poblaciones; presentan, por tanto, los resultados obtenidos por la genética de poblaciones. De acuerdo con la orientación de sus autores, Dobzhansky y Ayala, se exponen principalmente los resultados experimentales obtenidos en dicho campo. La utilización de los modelos matemáticos se reduce a un mínimo y a los más elementales.

Ayala, en el capítulo segundo, se ocupa de la variabilidad genética observada en las poblaciones. Trata de dicha variabilidad a nivel molecular (de ADN y proteínas) y fenotípico, así como de los métodos utilizados para medirla. Plantea la existencia de los dos modelos antagónicos, el "clásico" y el de "equilibrio", que casi desde el origen de la genética de poblaciones se formularon sobre la estructura genética de las comunidades.

Prosigue Ayala su estudio en el capítulo tercero: sobre el origen de la variabilidad en las poblaciones. Describe el fenómeno de la mutación, en sus términos más amplios. Integra los conocimientos más recientes sobre el mecanismo de la mutación a nivel molecular, el significado de las duplicaciones deducido del análisis de la estructura primaria de las proteínas, la existencia de ADN repetitivo en los eucariotas, etc., con los más clásicos sobre cambios de estructura y numéricos de los cromosomas y sobre los efectos de las mutaciones a nivel del fenotipo de caracteres morfológicos y fisiológicos. Tanto en este capítulo como en el anterior, discute si la variabilidad tiene o no significado adaptativo.

Dobzhansky, en el capítulo cuarto, estudia la selección natural. Después de precisar el concepto, analiza sus distintas manifestaciones como selección normalizadora, equilibradora, diversificadora y direccional. En todos estos puntos destaca que el resultado de la selección es la adaptación. Como casos especiales de la selección natural considera la selección sexual, la de grupo y por parentesco.

También Dobzhansky es el autor del capítulo quinto. Aborda la diferenciación genética de las distintas poblaciones de una especie, pudiendo formar razas y subespecies distintas. Discute ampliamente el origen de dicha diferenciación y considera que sus principales determinantes son la selección natural, la deriva genética y la interacción entre ambas. La deriva genética no había sido tratada previamente. Por ello, se introduce su concepto y su significado en relación con la evolución de los caracteres que aparecen con variabilidad neutra, no afectada por la selección; pudiera tratarse de algo real en las poblaciones naturales. Dedica un apartado bastante extenso a la variación racial en el hombre.

En los capítulos sexto, séptimo y octavo, se estudian los mecanismos de la evolución a nivel de especie y supraespecífico. Dobzhansky, en el capítulo sexto, analiza el fenómeno de la especiación, en particular en los grupos taxonómicos que tienen reproducción sexual cruzada. Arranca de la idea de que las nuevas especies se originan a partir de las razas geográficas y las subespecies cuando entre ellas aparecen mecanismos de aislamiento reproductor. Analiza las diferencias que a distintos niveles (morfológico, cromosómico, molecular, etc.) se producen entre las especies y cita algunos ejemplos de semiespecies como situaciones límite entre razas y especies.

Un especialista en genética de poblaciones de plantas, como Stebbins, constituye la persona idónea para tratar de los distintos modos de especiación existentes. El modo de especiación está relacionado con el sistema de reproducción y éste es muy variable en las plantas. Se ocupa primero del modelo convencional de especiación geográfica y del modelo cuántico. Analiza, más adelante, las características de los mecanis-

mos de aislamiento en animales y plantas y, centrándose más en las plantas, estudia casos de semiespecies, así como el significado evolutivo de la poliploidía y la reproducción asexual.

En el capítulo octavo, Valentine estudia la evolución a nivel superior al de la especie. Después de una introducción bastante extensa sobre la jerarquía taxonómica, presenta los distintos modelos que se han elaborado para explicar la evolución en los niveles taxonómicos superiores. Clasifica estos modelos en no adaptativos, adaptativos y genéticos. Se formulan aquí algunas de las teorías evolutivas omitidas en el capítulo primero, al tratar de la historia de las teorías de la evolución. Explicable quizá por la formación del autor, en este capítulo se comprueba a menudo una mayor preocupación por el aspecto filogenético que en los anteriores, así como un menor énfasis en el mecanismo genético de la evolución.

En los capítulos 9 al 14, el énfasis puesto en los mecanismos de la evolución se desplaza a las características del proceso de la evolución y, en gran parte, a la filogenia. Ayala, en el capítulo noveno, plantea en términos generales el problema de la filogenia a partir de los conceptos de analogía y homología. Luego estudia el valor que para la determinación de filogenias tienen los cromosomas, el ADN y las proteínas. En relación con estas últimas expone, críticamente, la teoría neutralista de su evolución, así como su utilización como reloj molecular del fenómeno evolutivo.

En el capítulo décimo, Valentine analiza las deducciones generales que sobre el proceso de la evolución pueden hacerse al estudiar el registro fósil. En una primera parte del capítulo da información sobre la metodología utilizada en la determinación del tiempo geológico, así como sobre las condiciones geológicas y paleoecológicas en que se produjo el registro fósil. También aborda las características de dicho registro, las grandes discontinuidades que presenta, lo fragmentarios que son los restos hallados, la falta de información biológica sobre las especies que lo constituyen, etc. En la segunda parte analiza la información que los fósiles aportan sobre la tasa de la evolución, los modos de extinción de especies y linajes evolutivos y los modos de diversificación.

Valentine se responsabiliza también del capítulo undécimo, sobre el origen de la vida. No se detiene en los aspectos bioquímicos de dicho origen. Se limita a discutir las posibles condiciones de la Tierra primitiva y a describir muy brevemente el experimento de síntesis abiótica de compuestos orgánicos de Miller, examinando sus resultados y los de cuantos han seguido esta línea de investigación. Pasa luego a elucubrar sobre el posible origen de la selección natural y de las protocélulas. Termina con unas consideraciones sobre la posibilidad de vida en distintos lugares del Universo.

En la primera parte del capítulo duodécimo discute Stebbins la filogenia general de los seres vivos, destacando el escaso valor que tiene actualmente la clásica división en dos Reinos, vegetal y animal. En la segunda parte trata de la filogenia de los virus, las bacterias y del origen de los eucariotas. En esta segunda parte, junto a la presentación de datos sobre las características de dichos grupos que sirven para establecer su filogenia, hace consideraciones más especulativas. De modo particular se refieren al origen de la fotosíntesis, de varios orgánulos de la célula eucariota, de la mitosis y de la sexualidad. No se aborda en esta obra la evolución y filogenia de los vegetales, si se exceptúa una referencia muy breve a algunos grupos de algas al final de este capítulo.

La filogenia y evolución de los Metazoos la desarrolla Valentine en el capítulo decimotercero. El autor presenta de una forma integrada la evolución morfológica y de niveles de organización en los animales, junto con datos paleontológicos, paleoecológicos y adaptativos. En el tratamiento sistemático describe separadamente la evolución de los invertebrados y la de los cordados.

En el capítulo decimocuarto se estudia la evolución del hombre por Dobzhansky. Primero analiza las características anatómicas y bioquímicas que relacionan la especie humana con los demás mamíferos, principalmente con los monos superiores, y después presenta los datos paleontológicos sobre el origen de *Homo sapiens*. Luego, dedica aproximadamente la mitad del capítulo al estudio de la cultura y mente humanas, revisando sus bases biológicas.

En un corto capítulo, el décimoquinto, Stebbins se enfrenta con el futuro de la evolución, más concretamente con el de la evolución humana. Plantea la cuestión del control artificial de la evolución orgánica. En este punto podría tratarse más extensamente, y de una forma más concreta, el actual desarrollo de la ingeniería genética y sus posibilidades.

Finalmente, en el último capítulo, Ayala expone con cierto detenimiento los aspectos filosóficos de la evolución. Comienza analizando en qué consiste el método científico y cómo éste se utilizó por Mendel y Darwin para la adquisición de los conocimientos básicos sobre la evolución. Después plantea y explica las distintas posiciones que se han adoptado en la interpretación de los fenómenos biológicos: mecanicismo y vitalismo, reduccionismo y composicionismo. Termina con un iluminador análisis de las explicaciones teleológicas y del concepto de progreso en biología. (A. P.)

HISTOLOGIA E HISTOFISIOLOGIA HUMANAS, por M. Maillet, Ed. A. C.: Madrid, 1980. HISTOLOGIA VEGETAL BASICA, por F. Cortés. H. Blume Ed.; Madrid, 1980. Han aparecido cinco de los seis fascículos que constituyen la obra de Marc Maillet. El autor no es un desconocido, pues dos de sus obras más recientes han sido traducidas al castellano: "Fundamentos de citología animal" (1975) y "Manual de citología" (1978); obra esta última de gran interés, muy actualizada y que, a pesar de ser un libro muy condensado, aborda escuetamente pero a la vez con profundidad temas como el nucléolo. Se ocupa incluso de las láminas anilladas, estructuras que, no obstante haber sido descritas en la década de los cincuenta, faltan en muchas citologías de edición reciente.

El texto de estos fascículos es sumario, aunque altamente informativo. Abundan los esquemas referentes a la morfología celular, a la estructura y a la ultraestructura de los diversos orgánulos, poseyendo la cualidad de los buenos esquemas, es decir, están bien proporcionados; a veces, pueden contemplarse imágenes de microtúbulos cuyo diámetro coincide con el de un peroxisoma, por ejemplo. El hecho de que toda interpretación ultraestructural vaya acompañada del correspondiente esquema es muy ilustrativo para cotejar ambos niveles de observación, lo que no siempre resulta fácil a las personas no versadas en estos estudios.

El fascículo *1* está dedicado al tejido epitelial de revestimiento, el *2* a los tejidos epiteliales glandulares (glándulas exocrinas y endocrinas), el *3* a los tejidos de sostén (es decir, a los tejidos de la serie del conjuntivo: el conjuntivo propiamente dicho, el adiposo, el cartilaginoso y el óseo). Cabe subrayar que en el capítulo dedicado a la osificación, ésta aparece expuesta con una claridad

casi diáfana, por lo que uno de los capítulos más "hueso" de la histología deviene comprensible.

El fascículo número cuatro se ocupa del tejido muscular en sus diversas modalidades (estriado, liso y cardíaco); los esquemas referentes a la disposición molecular de los componentes de las miofibrillas son de una sencillez altamente informativa; se exponen los distintos modelos en bucle, hoy admitidos. El esquema de la sinapsis que figura en la pág. 23, por su detalle, se diría que es un cuadro de Brughel o un dibujo de Mitsumasa Anno. Cuadros y tablas de la bioquímica de la contracción muscular aparecen con profusión. Estructura y funcionalidad presiden la obra de Maillet. La organización de la musculatura cardíaca, sin embargo, y siguiendo la tónica de la mayoría de los tratados de histología, no se explica con suficiente pormenor.

El fascículo 5 trata del tejido nervioso. Aunque de forma excesivamente breve, el autor hace, en todos los apartados, alguna alusión de tipo metodológico; así, al referirse al aparato o complejo de Golgi de la célula nerviosa menciona las técnicas de impregnación argéntica, describiendo el aspecto "clásico" para pasar a continuación al ultraestrutural. Se limita a definir los diversos componentes que aparecen en el núcleo de las neuronas, como son el cuerpo accesorio de Cajal, los satélites nucleolares, los bastoncitos nucleares, etcétera, sin llegar a profundizar en su origen ni en su posible significado.

Aunque los cinco fascículos aparecidos hasta el momento no han sido traducidos por el mismo autor, la obra en su conjunto ha sido supervisada por el profesor L. Zamorano, lo que ha permitido la adopción de una terminología coherente en los distintos fascículos; por más que en la denominación de determinadas estructuras no estemos totalmente de acuerdo, ha de reconocerse la unidad terminológica mantenida para los diversos tejidos, fiel reflejo del original.

Estos fascículos no pueden suplir ninguna de las últimas ediciones de los grandes tratados de histología, como el Bloom-Fawcett, el Ferrer o el Ham (a pesar de que algunas traducciones dejen mucho que desear). Pero mi experiencia diaria con la población estudiantil me hace constatar que la mayoría de los alumnos prefieren las obras condensadas y de clara exposición, aunque estas dos cualidades raras veces se conjugan en un mismo texto, a la consulta de los grandes tratados.

Por todo ello esta nueva obra de Marc Maillet, profesor de histología, embriología y citogenética en la Universidad de Tours, deberá ser acogida de buen agrado por parte de los estudiantes de biología, medicina y veterinaria, así como por el joven profesorado que se inicia en sus lides docentes.

Sería sumamente interesante que apareciese en el mercado editorial una obra similar a la que comentamos, pero que fuese un estudio comparativo de lo que acontece en los distintos tejidos a nivel de los diversos grupos de invertebrados, dado que la bibliografía existente hasta el momento es escasa y se fundamenta principalmente en las separatas. Siendo asimismo muy raras las obras de histología de vertebrados no mamíferos.

Tampoco abundan los tratados de histología y anatomía vegetal. Recordemos a vuela pluma el Eames y Mac Daniels, el Cutter, Esau, Fahn, sin olvidar algunas citologías vegetales como el clásico Guilliermond, el Nougarède y el Buvat. Los grandes tratados de botánica, como el Abrayes y col., el Gola, Negri y Carpelleti o el Strasburger, suelen dedicar varios capítulos al estudio de la organización histológica de las plantas.

Obras de autores españoles sobre la estructura microscópica de los vegetales constituyen una auténtica rareza, con las salvedades de rigor: las páginas sobre la célula vegetal de la obra "Introducció a la Botànica" de Font i Quer (1938), recientemente reeditada (1979), o incluso el libro del padre Pujiula "El vegetal a través del microscopio" (1956), que presenta numerosas aportaciones inéditas. Thomas-Domènech en su "Atlas de Botánica" (1961) recoge lo más característico de la organización microscópica tanto de criptógamas como de fanerógamas; de 1968 data el librito de Román "Los tejidos vegetales", de gran interés práctico, ya que a diferencia de los anteriormente mencionados es muy técnico y explica los métodos usuales para destacar los distintos tejidos y componentes celulares.

Debemos pues alegrarnos de la aparición de la "Histología vegetal básica", de F. Cortés, fisiólogo español, en la que como indica su título hace referencia únicamente a los conceptos fundamentales, ocasión que aprovecha el profesor López-Saéz para encabezar el prólogo con aquella famosa sentencia de Gracián: "Lo bueno, si breve, dos veces bueno".

Tras introducirnos en la organización de las plantas vasculares, se aborda de un modo muy superficial la célula; la pared celular, organización característica de la unidad estructural y funcional de los vegetales, está tratada, empero, con mayor profundidad que el resto de las estructuras celulares, cloroplastos incluidos, que se saldan con una escueta descripción. Nos sorprende que el autor utilice el vocablo latino "torus" para designar el engrosamiento que presenta la lámina media, a nivel de las puntuaciones aeroladas, cuando el vocablo toro está admitido en el Diccionario de la Academia de la Lengua.

Posiblemente la obra haya quedado retenida algún tiempo en la editorial y ello explique que, a pesar de haber aparecido en 1980, todavía haga referencia a los cuantosomas al explicar los tilacoides. Los datos obtenidos con la aplicación de las técnicas de la criofractura, muy empleada para el estudio de membranas, tanto vegetales como animales, ha resuelto negativamente la realidad de dichos corpúsculos.

Pasa luego revista a los meristemos, parénquima, colénquima y esclerénquima, xilema y floema. El capítulo 7, desarrollado con cierta extensión, trata de la epidermis y de las diversas estructuras que en ella pueden encontrarse (estomas, tricomas, pelos radicales, etcétera). Aborda a continuación el estudio del tallo con sus estructuras primaria y secundaria, para seguir con la organización de la hoja. Particularmente interesante nos parece la figura 10-5 (pág. 86), muy ilustrativa, ya que presenta cortes histológicos de tres hojas con sus respectivos pecíolos. En el capítulo 10, centrado en la raíz, encontramos a faltar las diferencias estructurales de los distintos parénquimas de reserva. La flor, el fruto y la semilla son tratados muy superficialmente.

La ilustración se reparte entre una profusión de esquemas bien proporcionados y escasas electromicrografías, algunas de las cuales no han quedado excesivamente bien reproducidas. Faltan en el texto consideraciones sobre las técnicas más adecuadas para poner de relieve los distintos orgánulos celulares (mitocondrias, plastos, vacuolas, etcétera) y los materiales que forman las paredes celulares (celulosa, lignina y suberina, entre otros).

La bibliografía, sin ser exhaustiva, es completa; nos hubiera gustado dar con la presencia de Guilliermond, los trabajos de Buvat, Coulomb, Mulethaler, etc. La presente obra podrá ser utilizada con gran provecho por los profesores de segunda enseñanza, así como por los estudiantes universitarios de biología y farmacia, como libro introductor a la consulta de los grandes tratados de anatomía vegetal. (M. D.)

Bibliografía

Los lectores interesados en una mayor profundización de los temas expuestos pueden consultar los trabajos siguientes:

RACCHI (PERU), UN ENIGMA ARQUEOLOGICO

ART DES INCAS. Catalogue de l'Exposition J. L. au Palais du Trocadero. Musée d'Ethnographie, París; junio-octubre, 1933.

ARQUITECTURA INKA. Graziano Gasparini y Luise Margolies. Centro de investigaciones históricas y estéticas. Universidad Central de Venezuela. Caracas, 1977.

MITO, LEYENDA, TERGIVERSACION EN TORNO A CACHA Y EL "TEMPLO" DE RACCHI. Manuel Ballesteros Gaibrois en *Historia y Cultura,* n.º 12. Revista del Museo Nacional de Historia. Lima, 1979.

SUPERVIVENCIAS DEL "AYLLU" ANDINO Y SUS CARACTERISTICAS (COMARCA DE EL CUZCO). Manuel Ballesteros Gaibrois y M.ª del Carmen Martín Rubio en *Revista de la Universidad Complutense.* Madrid, 1980.

VIROIDES

STRUCTURE AND FUNCTION OF VIROIDS. H. L. Sänger en *Slow Transmissible Diseases of the Nervous System,* dirigido por Stanley B. Prusiner y William J. Hadlow. Academic Press, 1979.

VIROIDS AND VIROID DISEASES. T. O. Diener, John Wiley & Sons, Inc., 1979.

VIROIDS: A CLASS OF SUBVIRAL PATHOGENS. H. J. Gross y D. Riesner en *Angewandte Chemie: International Edition in English,* vol. 19, n.º 4, págs. 231-243; abril, 1980.

EL CORAZON ARTIFICIAL

THE FIRST MECHANICAL HEART TRANSPLANT: INFORMED CONSENT AND EXPERIMENTATION. William J. Curran en *The New England Journal of Medicine,* vol. 291, n.º 19, págs. 1015-1016; 7 de noviembre de 1974.

CRITERIA FOR HUMAN TOTAL ARTIFICIAL HEART IMPLANTATION BASED ON STEADY STATE ANIMAL DATA. R. K. Jarvik, D. B. Olsen, T. R. Kessler, J. Lawson, J. English y W. J. Kolff en *Transactions of the American Society for Artificial Internal Organs,* vol. 23, págs. 535-542; 1977.

ASSISTED CIRCULATION. Dirigido por Felix Unger. Springer-Verlag, 1979.

TRANSIENT AND PERMANENT PROBLEMS ASSOCIATED WITH THE TOTAL ARTIFICIAL HEART IMPLANTATION. T. Murakami, K. Ozawa, H. Harasaki, G. Jacobs, R. Kiraly y Y. Nosé en *Transactions of the American Society for Artificial Internal Organs,* vol. 25, págs. 239-248; 1979.

LA GALAXIA DE ANDROMEDA

A RADIO CONTINUUM SURVEY OF M31 AT 2695 MHZ, I: OBSERVATIONS; COMPARISON OF RADIO CONTINUUM DATA. Elly M. Berkhuijsen y R. Wielebinski en *Astronomy and Astrophysics,* vol. 34, n.º 2, págs. 173-179; agosto, 1974.

THE OPEN STAR CLUSTERS OF M31 AND ITS SPIRAL STRUCTURE. Paul W. Hodge en *The Astronomical Journal,* vol. 84, n.º 6, págs. 744-751; junio, 1979.

STUDIES OF LUMINOUS STARS IN NEARBY GALAXIES, IV: BAADE'S FIELD IV IN M31. Roberta M. Humphreys en *The Astrophysical Journal,* vol. 234, n.º 3, 1.ª parte, págs. 854-860; 15 de diciembre de 1979.

LOS RECURSOS GENETICOS DEL TRIGO SILVESTRE

HYBRIDIZATION BETWEEN AMPHIDIPLOIDS AND THE EVOLUTION OF POLYPLOIDS IN THE WHEAT (*AEGILOPS-TRITICUM*) GROUP. Daniel Zohary y Moshe Feldman en *Evolution,* vol. 16, págs. 44-61; 1962.

INTERSPECIFIC RELATIONSHIP IN *TRITICUM* AND *AEGILOPS.* Hitoshi Kihara en *Seiken Zihô (Informe del Instituto Kihara de Investigaciones Biológicas),* n.º 15, págs. 1-12; 1963.

THE WHEATS AND THEIR RELATIVES. E. R. Sears en *Handbook of Genetics,* dirigido por Robert C. King. Plenum Press, 1975.

EL PROBLEMA CUERPO-MENTE

RES COGITANS: AN ESSAY IN RATIONAL PSYCHOLOGY. Zeno Vendler. Cornell University Press, 1972.

THE LANGUAGE OF THOUGHT. Jerry A. Fodor, Thomas Y. Crowell Co., 1975.

MIND, LANGUAGE AND REALITY: PHILOSOPHICAL PAPERS, vol. 2. Hilary Putnam. Cambridge University Press, 1975.

READINGS IN PHILOSOPHY OF PSYCHOLOGY, vol. 1. Dirigido por N. Block. Harvard University Press, 1980.

GELES

SPECTRUM OF LIGHT SCATTERED FROM A VISCOELASTIC GEL. Toyoichi Tanaka, Lon O. Hocker y George B. Benedek en *The Journal of Chemical Physics,* vol. 59, n.º 9, págs. 5151-5159; 1 de noviembre de 1973.

CRITICAL BEHAVIOR OF DENSITY FLUCTUATIONS IN GELS. Toyoichi Tanaka, Shin'ichi Ishiwata y Coe Ishimoto en *Physical Review Letters,* vol. 38, n.º 14, págs. 771-774; 4 de abril de 1977.

COLLAPSE OF GELS AND THE CRITICAL ENDPOINT. Toyoichi Tanaka en *Physical Review Letters,* vol. 40, n.º 12, págs. 820-823; 20 de marzo de 1978.

PHASE TRANSITIONS IN IONIC GELS. Toyoichi Tanaka, David J. Fillmore, Izumi Nishio, Shao-Tang Sun, Gerald Swislow y Arati Shah en *Physical Review Letters,* vol. 45, n.º 20, págs. 1636-1645; 17 de noviembre de 1980.

HISTORIA PARALELA DEL TELEFONO

BELL: ALEXANDER GRAHAM BELL AND THE CONQUEST OF SOLITUDE. Robert V. Bruce. Little, Brown and Company, 1973.

ELISHA GRAY AND THE TELEPHONE: ON THE DISADVANTAGES OF BEING AN EXPERT. David A. Hounshell en *Technology and Culture,* vol. 16, n.º 2, págs. 133-161; abril, 1975.

BELL AND GRAY: CONTRASTS IN STYLE, POLITICS, AND ETTIQUETE. David A. Hounshell en *Proceedings of the IEEE,* vol. 64, n.º 9, págs. 1305-1314; septiembre, 1976.

TALLER Y LABORATORIO

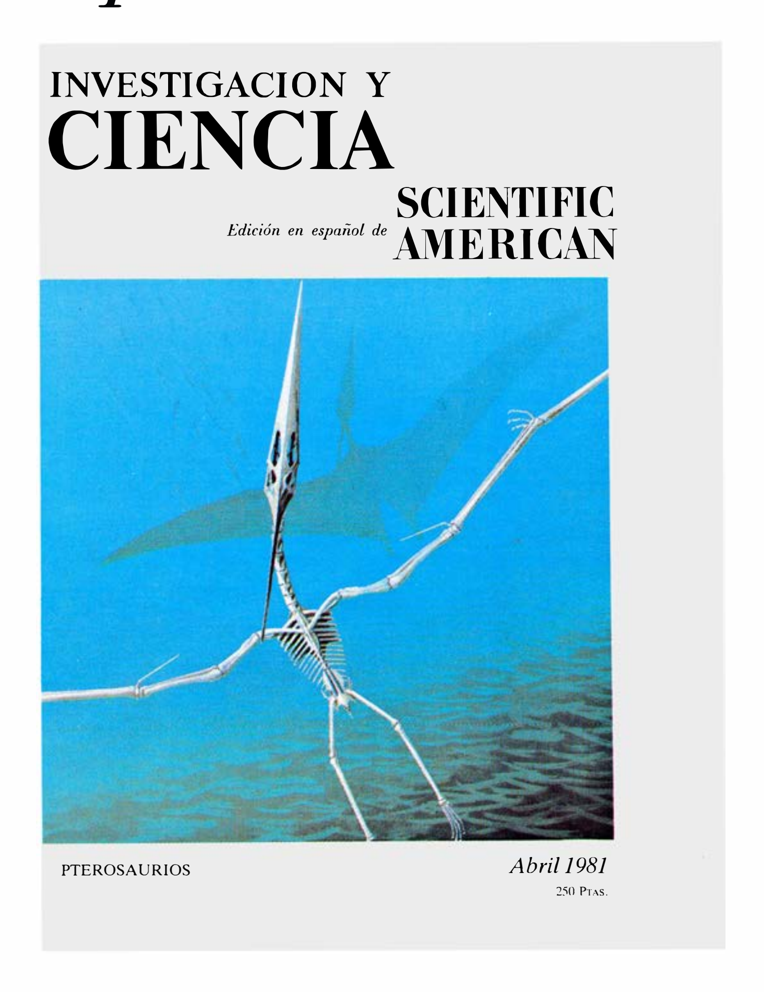
FUNDAMENTALS OF OPTICS. Francis A. Jenkins y Harvey E. White. McGraw-Hill Book Company, 1976.

A MATRIARCHAL SOCIETY: SAUCES. Madeleine Kamman en *The Making of a Cook.* Atheneum Press, 1978.

LASER ART & OPTICAL TRANSFORMS. T. Kallard. Optosonic Press, 1979.

LASERS. En *Light and Its Uses: Making and Using Lasers, Holograms, Interferometers, and Instruments of Dispersion.* Con introducciones de Jearl Walker, W. H. Freeman and Company, 1980.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



LAS ESCULTURAS NOK DE NIGERIA, por Thurstan Shaw
Estas singulares figuras de terracota se remontan a 2500 años atrás. Asociadas tanto a útiles de piedra como a hornos de fundición de hierro, plantean problemas sobre la función del arte y la definición de una cultura.

EL CULTIVO DEL ARROZ EN CALIFORNIA, por J. Neil Rutger y D. Marlin Brandon
Realizando la siembra y los tratamientos herbicidas desde el aire y aplicando en la explotación métodos agrícolas ultramodernos, los arroceros de California obtienen altos rendimientos en sus cosechas.

EL NUCLEOSOMA, por Roger D. Kornberg y Aaron Klug
La subunidad elemental de la estructura del cromosoma es una superhélice enrollada sobre una canilla de proteínas histónicas. El artículo recoge el descubrimiento del nucleosoma y la determinación de su estructura.

ENFERMEDADES POR AUTOINMUNIDAD, por Noel R. Rose
Alteraciones del sistema inmunitario en las que el organismo ataca sus propios tejidos originan varias enfermedades cuyo origen, hasta ahora, se desconocía. La comprensión de los mecanismos implicados proporciona nuevos métodos terapéuticos.

PTEROSAURIOS, por Wann Langston, Jr.
Ni dinosaurios ni aves, estos seres fueron reptiles voladores que perduraron a lo largo de 135 millones de años. Se supone que algunos de ellos, con una envergadura alar de 12 metros, han sido los mayores animales voladores.

PROTEOLISIS INTRACELULAR, por Santiago Grisolía, Erwin Knecht y José Hernández-Yago
La comprensión de los factores que regulan la dinámica del recambio de proteínas puede aportar datos de gran interés en problemas relativos a la alimentación, el aprovechamiento de energía, el envejecimiento y las enfermedades metabólicas.

TELESCOPIO SUBMARINO DE NEUTRINOS, por John G. Learned y David Eichler
Los fenómenos de alta energía, como las supernovas o las estrellas dobles de rayos X, podrían emitir un flujo de neutrinos. Una red de sensores protegida por cinco kilómetros de agua quizá pueda detectar selectivamente esas partículas.

LOS CICLOS DE ACTIVIDAD DE LAS ESTRELLAS, por Olin C. Wilson, Arthur H. Vaughan y Dimitri Mihalas
Se han observado variaciones de la actividad, semejantes al ciclo de 11 años de las manchas solares, en 91 estrellas próximas. Su estudio puede revelar por qué se produce el ciclo y por qué a veces desaparece, como ha ocurrido en tiempos pasados con el ciclo solar.

